

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMLARININ ATIMLI Nd:YAG
LAZERİ KULLANILARAK KAYNAK EDİLMESİ VE KAYNAK
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Fizikçi Erhan AKMAN

Anabilim Dalı: Fizik

Danışman: Prof. Dr. Arif DEMİR

KOCAELİ 2006

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMLARININ ATIMLI ND:YAG
LAZERİ KULLANILARAK KAYNAK EDİLMESİ VE KAYNAK
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizikçi Erhan AKMAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 30 Kasım 2006

Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Ocak 2007

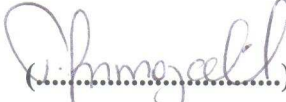
Tez Danışmanı

Prof.Dr.Arif DEMİR

()

Üye

Doç.Dr. Tamer SINMAZÇELİK

()

Üye

Yrd.Doç.Dr.Şerafettin YALTKAYA

()

KOCAELİ, 2006

ÖNSÖZ TEŞEKKÜRLER

Yüksek lisans tez çalışmamın hazırlanmasında, sabır ve titizlikle verdiği tüm emekler ve geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısı için sayın hocam Arif DEMİR'e teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans çalışmam süresince yol göstericiliği ve motivasyonu ile çalışmalarımın bu noktaya gelmesinde büyük önemi olan ODTU Fizik Bölümü öğretim üyelerinden değerli hocam Sinan Bilikmen'e teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi Öğretim Üyelerinden sayın hocalarım Tamer Sınmazçelik'e, Elif Kaçar'a, Timur Canel'e ve LатарUM'daki çalışma arkadaşlarıma teşekkür ediyorum.

Tez çalışmam süresince TÜBİTAK-MAM'da yürütülmekte olan DPT destekli "Titanyum hassas döküm" başlıklı proje kapsamında verdikleri katkılardan ötürü Malzeme Enstitüsü yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Aileme yüksek lisans çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve destek için teşekkür eder saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	viii
ÖZET.....	x
İNGİLİZCE ÖZET.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİBLERİ.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Isısal Denge ve Einstein Katsayıları.....	4
2.2.1 Kendiliğinden geçiş olasılığı.....	4
2.2.2 Soğurma ve uyarılmış yayılma olasılığı.....	6
2.3. Bir Lazer Üretmek İçin Gerek ve Yeter Şartlar.....	8
2.3.1 Soğurma ve kazanç.....	8
2.3.2 Sayı yoğunluğu tersinimi.....	10
2.3.3 Doyma şiddeti.....	11
2.3.4 Bir lazer demetinin gelişmesi ve büyümesi.....	12
2.4 Lazerlerin Kullanım Alanları.....	14
2.4.1 Lazer demetini diğer ışık kaynaklarından ayıran özellikler.....	16
2.4.2 Lazerlerin kullanım alanları.....	17
2.4.3 Lazer ile malzeme işleme: delme, kesme, kaynak.....	18
2.5 Nd:YAG Lazer.....	22
3. LAZER İLE MALZEME İŞLEME: KAYNAK.....	27
3.1 Giriş.....	27
3.2 Lazer İle Kaynak Yöntemleri.....	30
3.2.1 İletimle kaynak.....	31
3.2.2 Derinlemesine nüfuz eden kaynak.....	33
3.3 Lazer İle Kaynak İşlemi Sırasında Gerçekleşen Fiziksel Olaylar.....	36
3.3.1 Soğurma.....	36
3.3.2 İletim.....	38
3.3.3 Erime ve buharlaşma.....	40
3.4 Atımlı Nd:YAG Lazer Parametrelerinin Dikiş Kaynağına Etkisi.....	43
3.4.1 Atımın tepe gücü.....	45
3.4.2 Atım süresi.....	46
3.4.3 Atımın odak konumu.....	47
3.4.4 Atım frekansı ve hız.....	48
3.4.5 Atım şekli.....	49
3.4.6 Koruyucu gaz.....	50
4. LAZER İLE MALZEME İŞLEME DENEY DÜZENEGİ: LAZER SİSTEMİ, ÖLÇÜM SİSTEMİ VE MATERYAL.....	52
4.1 Nd:YAG Lazeri ve Deneysel Düzenek.....	52

4.2 Lazer Demetinin Odağının Belirlenmesi	56
4.3 Ti6Al4V Titanyum Alaşımlar	58
4.4 Ti6Al4V Titanyum Alaşımların Kaynak İşlemine Hazırlanması	60
5. Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMLARININ KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	62
5.1 Atım Tepe Gücünün Belirlenmesi ve Kaynak İşlemindeki Etkisi	63
5.2 Atım Süresinin Kaynak Derinliğine Etkisi	65
5.3 Kaynak Hızı ve Lazer Frekansının Kaynak Üzerindeki Etkisi	67
5.4 Koruyucu Gazın Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkisi	67
5.5 Çift Taraflı Kaynak Çalışmaları	69
5.6 Vickers Sertlik Testi	71
6. SONUÇ	74
KAYNAKLAR	76
KİŞİSEL YAYINLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. (a) Atomun üst enerji seviyesinin yoğunluğunun zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi.....	5
(b) Işımalı kendiliğinden geçiş olasılığının üst enerji seviyesi yaşam ömrüne bağlılığı.....	5
Şekil 2.2. Atomun enerji seviyeleri arasındaki ışmalı geçişler	6
Şekil 2.3. (a) Uzunluğu L ve kesit alanı A olan bir soğurucu ortamın I_0 şiddetindeki bir lazer ışınına etkisi.....	9
(b) İki seviyeli sistemin enerji seviyeleri arasındaki süreçle; kendiliğinden ışımaya, uyarılmış ışımaya ve soğurma	9
Şekil 2.4. (a) Isısal denge durumunda u ve l seviyeleri arasındaki sayı yoğunluğu dağılımı	11
(b) Sayı yoğunluğu olduğu durumda u ve l seviyeleri arasındaki sayı yoğunluğu dağılımı	11
Şekil 2.5. Kuvvetlenme uzunluğunun bir fonksiyonu olarak bir lazer demetinin üstel olarak büyümesi ve doyması	12
Şekil 2.6. Uzunluğu L , tesir kesit alanı A ve çapı d_a olan silindirik bir kazanç ortamı.....	13
Şekil 2.7. Tipik bir Nd:YAG lazerinin kazanç ortamı ve geri besleme sistemleri.....	14
Şekil 2.8. Lazer ile delme işlemleri sırasında kullanılan; tek atımlı delme, keserek delme ve çok atımlı delme işlemleri	19
Şekil 2.9. Lazer ile delme işlemleri sırasında gerçekleşen ısınma ve malzeme çıkarma süreçleri	20
Şekil 2.10. Nd:YAG lazeri enerji düzeyleri.....	23
Şekil 2.11. 0.5 cm, 300 Kelvin sıcaklığında Nd:YAG kristaline ait soğurma bandı...24	
Şekil 2.12. Nd:YAG lazerine ait sıcaklık çizgi genişleme eğrisi	25
Şekil 2.13. Nd:YAG lazer kovuğu	26
Şekil 3.1. Lazer ile kaynak işlemleri sırasında oluşan bölgeler; Ana metal, Erimiş bölge, Isıdan etkilenmiş bölge	27
Şekil 3.2. Otomobil gövdesinde bulunan ve lazer ile kaynak yapılan eklemler.....	29
Şekil 3.3. Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak, iletimle ve derinlemesine kaynak işleminin paslanmaz çelik üzerindeki karşılaştırılması	30
Şekil 3.4. İletimle kaynak işlemi	32
Şekil 3.5. İletimle kaynak işleminden derinlemesine kaynak işlemine geçiş için kritik güç yoğunluğu	33
Şekil 3.6. Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı	35
Şekil 3.7. Yüksek şiddetli lazer ışınının metal yüzeye çarptığında gerçekleşen fiziksel süreç; Erime, Buharlaştırma ve Plazma oluşumu	41
Şekil 3.8. Şiddeti 10^5 W/cm ² olan bir lazer ışınması ile Nikel hedef üzerindeki hesaplanan nüfuz etme derinliği	41
Şekil 3.9. Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı	43
Şekil 3.10. Atımlı lazer kaynağı kalitesini etkileyen parametrelerin diyagramı	44

Şekil 3.11. Atım süresi 4ms olan Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 Alüminyum alaşımların kaynağında, tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi	45
Şekil 3.12. Farklı alaşımlar için atımlı Nd:YAG lazerinin tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi	46
Şekil 3.13. Atım gücü 1.25 kW olan Nd:YAG lazeri kullanılarak, 0.1mm kalınlığındaki bakır levhaların kaynak işlemi sırasında, lazer atım uzunluğunun kaynak genişliğine etkisi	47
Şekil 3.14. Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak (40 Hz frekansta 4.5 kW ortalama güç, 0.4 m/dk kaynak hızı) 14 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemelerin kaynak işlemi sırasında odak konumunun kaynak derinliğine etkisi	48
Şekil 3.15. Atımlı lazer ile kaynak işlemi sırasında üst üste binen periyodik spotlar	48
Şekil 3.16. GSI lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli ...	49
Şekil 3.17. Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma.....	50
Şekil 3.18. Lazerle kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazın akış yönünden kaynaklanan kusurlar.....	51
Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: güç ünitesi, lazer kovuğu ve odaklama ünitesi	53
Şekil 4.2. JK760TR Atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu	53
Şekil 4.3. Lazer demetinin TEM ₁₁ modunun demet şekil belirleyici (Newport) ile elde edilmiş görüntüsü	54
Şekil 4.4. Kaynak çalışmalarında kullanılan lazerin kare atım şekli	54
Şekil 4.5. Lazer odaklama ve koruyucu gaz ünitesi.....	55
Şekil 4.6. Koruyucu gaz ünitesi	56
Şekil 4.7. (a) Odak çapının yüksekliğe göre değişimi.....	57
(b) Mercek koruyucusundan metal yüzeyine olan mesafesinin değişimine göre spot çapının değişimi	57
Şekil 4.8. Kaynak işlemi sırasında lazer demetinin odak konumu.....	57
Şekil 4.9. (a) Mikro görüntüleme işlemi için hazırlanan kaynak numuneleri.....	60
(a) Çekme testi işlemleri için hazırlanan kaynak numuneleri.....	60
Şekil 5.1. Testler sırasında kullanılan mesafe simgeleri	62
Şekil 5.2. Atım enerjisinin kaynak havuzu derinliği üzerindeki etkisi.....	64
Şekil 5.3. Enerjideki artışın yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliğine etkisi.....	64
Şekil 5.4. Optik mikroskop ile çekilmiş fotoğraflar.....	65
Şekil 5.5. Tepe gücündeki aşırı artış sebebiyle kaynak havuzu yüzeyinde oluşan krater derinlikleri	65
Şekil 5.6. Atım süresinde ki artışa bağlı olarak Isıdan Etkilenmiş Bölge (HAZ) ve kaynak havuzu genişliklerinde meydana gelen değişimler	66
Şekil 5.7. Sabit tepe gücünde lazer atım süresinin kaynak derinliği üzerindeki etkisi	66
Şekil 5.8. Sabit tepe gücünde atım süresinde meydana gelen değişimlerin incelendiği optik mikroskop ile elde edilmiş fotoğraflar	67
Şekil 5.9. Koruyucu gaz ünitesi.....	68
Şekil 5.10. Gaz basıncının kaynak havuzu kararlılığı ve oksidasyon üzerindeki etkisi.....	68
Şekil 5.11. Tek taraflı kaynak yaparak optik mikroskop görüntülerine göre en iyisi olduğu düşünülen numune.....	69

Şekil 5.12. Çift taraflı kaynak işlemlerinde mesafe ölçümü için kullanılan simgeler.....	69
Şekil 5.13. Çift taraflı kaynak işlemi yapılan örneklerin optik mikroskop ile alınmış görüntüleri ve değişken olarak kullanılan enerji değerleri	70
Şekil 5.14. Metal üzerinde Vickers sertlik testinin yapıldığı noktalar.....	72
Şekil 5.15. Enerjisi 12.5 J, süresi 5 ms olan atım ile elde edilmiş kaynak numunesine ait Vickers sertlik testi	72
Şekil 5.16. Farklı tepe güçlerine ait örneklerin vickers sertlik testleri.....	73

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2.1	Günümüzde kullanılan lazerler ve özellikleri.....	15
Tablo 2.2	Lazerlerin kullanım alanları	17
Tablo 2.3	Lazerlerin sanayideki kullanım alanlarındaki yoğunluk	18
Tablo 2.4	Lazerler ile kaynak işlemi konusunda yapılan çalışmaların kısa bir tarihsel sıralaması.....	21
Tablo 2.5	Nd:YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler	25
Tablo 3.1	Farklı kaynak işlemleri için ısı gücü yoğunlukları.....	28
Tablo 3.2	Lazer kaynak işleminin diğer kaynak işlemlerine göre avantajları.....	28
Tablo 3.3	Madde ile ışığın etkileşimi sırasında önem taşıyan fiziksel olaylar.....	36
Tablo 3.4	Bazı metallerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları.....	37
Tablo 3.5	Bazı metallere ait ısısal yayılım katsayısı ve ısısal zaman sabitleri.....	39
Tablo 3.6	Bazı metallerin buharlaşma zamanına ulaşmaları için gereken zamanlar.....	42
Tablo 4.1	Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri.....	52
Tablo 4.2	Ti6AL4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri.....	59
Tablo 5.1	Kaynak işlemi sırasında kaynak derinliğini belirlerken kullanılan parametreler.....	63
Tablo 5.2	Çift taraflı kaynak işleminde kullanılan lazer parametreleri.....	70

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ΔE_{ul}	: İki seviye arasındaki enerji farkı
E_u	: Üst enerji seviye enerjisi.
E_l	: Alt enerji seviye enerjisi.
N_u	: Üst enerji seviyesi elektron yoğunluğu.
N_l	: Alt enerji seviyesi elektron yoğunluğu.
Nu^0	: Başlangıç durumunda üst seviyenin elektron yoğunluğu
A_{ul}	: Kendiliğinden ışımaya olasılığı.
τ_u	: Üst seviyenin yaşam ömrü
B_{ul}	: Uyarılmış ışımaya geçiş olasılığı
B_{lu}	: Uyarılmış soğurma olasılığı
t	: Zaman
h	: Planck sabiti
ν, ν_0	: Işıma frekansı
u	: Üst Enerji seviyesi
l	: Alt Enerji seviyesi
g_u	: Üst seviyenin istatistik ağırlığı
g_l	: Alt seviyenin istatistik ağırlığı
k_B	: Boltzman sabiti
T	: Sıcaklık
c	: Işık Hızı
$u(\nu)$: Karacisim ışımaya enerji yoğunluğu
$\Delta\nu$: Frekans aralığı
$I(\nu)$: Birim frekans başına lazer şiddeti
L	: Kalınlık
A	: Tesir kesiti
I_0	: Soğurulan lazer şiddeti
$g(\nu)$: Kazanç katsayısı
z	: Ortam uzunluğu
m	: Metre
$\sigma_{ul}(\nu)$: Uyarılmış ışımaya tesir kesiti
d_a	: Silindirik bir lazer kazanç ortamının yarıçapı
l_g	: Kazanç ortamının başlangıç uzunluğu
B	: Işık kaynağı parlaklığı
P	: Lazer gücü
D	: Dairesel demet kesit çapı
Θ	: Sapma açısı
T_e	: Malzeme erime sıcaklığı
T_y	: Malzeme yüzey sıcaklığı
ms	: Milisaniye
μs	: Mikrosaniye
cm	: Santimetre
GHz	: Gigahertz (10^9 Hz)

nm	: Nanometre
ps	: Pikosaniye
W	: Watt
J	: Juole
E	: Atım Enerjisi
t_a	: Atım Süresi
k	: Isısal İletkenlik Katsayısı
α	: Soğurma Katsayısı
κ	: Isısal Yayılım Katsayısı
t_k	: Isısal Zaman Sabiti
w	: Gausyen Demet Yarıçapı
t_e	: Malzemenin erimesi için gereken süre
ρ	: Madde yoğunluğu
L_f	: Gizli füzyon sıcaklığı
z_h	: Kaynak havuzu derinliği
T_b	: Buharlaşma sıcaklığı
n	: Kırılma indisi
δ	: Malzemede enerjinin depo edildiği derinlik
λ	: Dalgaboyu
D_i	: Malzeme içinde ısının etki ettiği dikey mesafe
t_B	: Malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaşma zamanı
F	: Soğurulan ışımaya
A_s	: Lazer spot alanı
D_{delik}	: Lazer ile kaynak işlemi sırasında buharlaşan metal nedeni ile oluşan deliğin derinliği
V	: Kaynak hızı
L_s	: Hareket sırasında malzeme yüzeyine çarpan spotun uzunluğu
f	: Lazer atım frekansı
P_{ER}	: Lazer spotlarının üst üste binme oranı
I_{doy}	: Doyma şiddeti
LATARUM	: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
Nd:YAG	: Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
CW	: Sürekli mod lazer (continuous wave)
IEB	: Isıdan etkilenmiş bölge

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMLARININ ATIMLI Nd:YAG LAZERİ KULLANILARAK KAYNAK EDİLMESİ VE KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Erhan AKMAN

Anahtar kelimeler: Lazerle malzeme işleme, sanayide Nd:YAG lazerin uygulamaları, lazer kaynağı, titanyum alaşımları.

Özet: Titanyum alaşımlar düşük ağırlıkları ve korozyona karşı gösterdikleri yüksek dirençten dolayı otomotiv ve uzay endüstrisi için en avantajlı metallere biridir. Endüstride kullanılan parçaların minimum kusurlar ile güvenilir kaynak edilmesi için birçok teknik denenmiştir. Lazer kaynak işlemi, sunduğu uygun özelliklerinden dolayı en önemli birleştirme tekniklerinden biridir. Modern Nd:YAG lazerleri, kHz mertebelerinde dahi her bir atımın zamana bağlı profilini değiştirebilecek yetenektedir. Bu esneklik, malzeme içine olan ısı girişini daha önce olmadığı kadar kesin doğrulukta kontrol etme imkanı verir. Atımlı lazer kaynağı için, atım şekli, enerjisi, süresi, tekrarlama oranı ve tepe gücü kaynak kalitesini etkileyen temel parametrelerdir. Bu parametrelerin doğru kombinasyonu, atımlı lazer dikiş kaynağı için çok önemlidir.

Bu çalışmada Lumonics JK760TR Nd:YAG lazeri kullanıldı. Ti6Al4V titanyum alaşımların atımlı lazer dikiş kaynağı parametrelerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Atım enerjisi ve atım süresi arasındaki oran kaynak derinliğini belirlemedeki en önemli faktördür. 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.

WELDING OF Ti6Al4V TITANIUM ALLOYS WITH PULSED Nd:YAG LASER AND DETERMINING OF WELDING PARAMETERS

Erhan AKMAN

Key words: Laser material processing, Pulsed Nd:YAG laser applications in industry.

Abstract: Because of the light weight and excellent corrosion resistance of the titanium alloys are the most advantageous materials for the automotive and aerospace industry. In order to achieve reliable welds with minimal distortion for fabrication components for industry several techniques were investigated. Laser welding is the most important joining technique because of its desired features. Modern Nd:YAG lasers have the ability to shape the temporal profile of each pulse at repetition rates of up to several kHz. This flexibility gives control of thermal input with a precision not previously available. For pulsed laser welding, pulse shape, pulse energy, pulse duration, pulse repetition rate and peak power are the main parameters that influence the weld quality. The combinations of these parameters are very important for pulsed laser seam-welding.

In this study, the Lumonics JK760 Nd:YAG pulsed laser was used, an experimental work has been done to determine pulsed laser seam-welding parameters for titanium alloy. The relationship between the pulse energy and the pulse duration is the main factor which is effective while determining the penetration depth. Therefore we determined initially pulse duration and the pulse energy, to obtain desired weld quality the pulse shape was constituted. And also we considered the repetition rate to determine the welding speed.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

Son yıllarda teknolojideki gelişmeler, sanayiden sağlığa, askeri savunmadan uzay endüstrisine kadar tüm alanlar, farklı birçok malzemenin kullanım gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu malzemelerin işlenmesindeki sorunlar lazer sistemlerinin sanayiye girmesi ile büyük ölçüde çözülmüş ve halen devam eden çalışmalar ile işlem kalitesi günden güne artmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında sağlık sektöründen uzay endüstrisine kadar birçok alanda kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımları Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak kaynakla birleştirilmiş ve kullanılan lazer parametrelerinin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2’de lazerlerin tarihsel gelişimini veren kısa bir literatür bilgisi ile birlikte lazerlerin çalışma prensipleri, bir lazer elde etmek için gerek ve yeter koşullar hakkında temel bilgiler verilecektir. Normal ışık kaynağından ayıran özellikleri nedeniyle çeşitli alanlarda kullanılan lazer çeşitleri ve özellikle bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazerinin çalışma prensipleri hakkında açıklamalar yer almaktadır.

BÖLÜM 3’de lazer ile kaynak yöntemleri, kaynak işlemi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar ve bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan atımlı Nd-YAG lazeri ile dikiş kaynağı ve lazer parametrelerinin dikiş kaynağına etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 4’te deneysel çalışmada kullanılan lazer, optik sistem ve tasarlanan deneysel düzeneği ayrıntılı olarak incelenecek ve kullanılan lazerin ve titanyum alaşımların kaynak işlemine hazırlanış aşamaları, kaynağı yapılan titanyum alaşımların özellikleri, kullanım alanları ile kaynak sırasında neden lazer kaynağına ihtiyaç duyulduğu ayrıntılı bir biçimde anlatılmaktadır.

Deneysel çalışmanın yapıldığı BÖLÜM 5'te en iyi kaynak parametreleri elde edilmeye çalışılmış ve parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri yapılan testler yardımı ile belirlenmeye çalışılmıştır, elde edilen bilgiler ve grafikler ayrıntılı bir biçimde verilmiş ve değerlendirmesi yapılmıştır.

BÖLÜM 6'da bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenerek, gelecekte yapılması olası çalışmalara değinilmiştir.

BÖLÜM 2 LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri ile simgelenen LASER, çeşitli yollarla elde edilen elektromanyetik ışımayı güçlendiren ve morötesi bölgesinden kızıl ötesi bölgeye kadar geniş bir spektrumda ışıma verebilen bir alettir. Bir lazer ışını elde etmek için gerek ve yeter şartlar üç grupta ele alınır: Işığın kuvvetlendirilmesini sağlayan kazanç ortamı, ortamı uyaran güç kaynağı ve doyuma ulaşabilmek için geri besleme sistemleri [1]. Lazerlerin, sağlık, endüstri, savunma sanayi, haberleşme gibi pek çok uygulama alanı vardır. Bu bölümde, lazerlerin tarihsel gelişimini veren kısa bir literatür bilgisi ile birlikte lazerlerin çalışma prensipleri, bir lazer elde etmek için gerek ve yeter koşullar hakkında temel bilgiler verilecektir. Normal ışık kaynağından ayıran özellikleri nedeniyle çeşitli alanlarda kullanılan lazer çeşitleri ve özellikle bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazerinin çalışma prensipleri hakkında açıklamalar bu bölümde yer almaktadır.

2.1 Giriş

Yirminci yüzyılın en büyük buluşlarından biri olan lazerin temelini oluşturan uyarılmış ışıma kavramı 1917 yılında Einstein tarafından ortaya konmuştur [2]. Mikrodalga güçlendirici sistemi ile uyarılmış yayılma sürecinin avantajının kullanıldığı MASER, mikrodalga bölgesinde ışıma yapan bir alet olarak Townes tarafından geliştirmiştir [3]. İletişimde kullanılmak amacıyla geliştirilen, elektromanyetik spektrumun mikrodalga bölgesinde uyumlu (coherent) bir demet üreten bu ilk mazerde, amonyak buharı kullanılarak 1.25 cm dalgaboyunda kazanç gözlenmiştir. Townes ve Schawlow; üretilen demetin kuvvetlenmesi için çevresi aynalar ile çevrili bir optik yükselteç sistemi tasarlamışlar ve bu çalışmaları ile Nobel ödülü almışlardır [3].

Theodore Mainman 1960 yılında, kazanç ortamı olarak yakut kristali ve enerji kaynağı olarak flaş lambası kullanarak ilk lazeri üretmiştir [4]. Takip eden yıllarda, yüksek şiddet gerektirmeyen ilk gaz lazeri olan helyum-neon lazeri [5]; iletişim konusunda oldukça geniş bir kullanım alanı bulan ilk yarıiletken lazer [6]; kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerde yaygın olarak kullanılan kızıl ötesi bölgesinde ışımaya veren CO₂ lazeri [7] ve yine kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel işlemlerinin yanında cerrahi uygulamalar ve askeri alanlarda da kullanılan Nd:YAG lazeri [8] üretilmiştir. Organik boya lazeri [9], soy gaz excimer lazeri [10], serbest elektron lazeri [11] 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 [12].

Lazer üretimi çalışmaları devam ederken, uygulamalarda en iyi verimin elde edilmesi amacıyla değişik şekillerde lazer kovuk (kavite) sistemleri [13], geri besleme sistemleri [1] tasarlanmıştır.

2.2 Isısal Denge ve Einstein Katsayıları

Lazer; tek renkli (monochromatic), uyumlu (coherence), yönelimli (directionally), parlak ışın demeti üreten bir alettir ve fiziksel temelini Einstein tarafından ortaya konan uyarılmış ışımaya oluşturur. Isısal denge durumunda, atomun enerji seviyelerinde meydana gelen ışımaya geçişler arasındaki ilişki Einstein katsayıları ve Boltzmann dağılımı ile verilir. Kendiliğinden geçiş olasılığı, soğurma ve uyarılmış ışımaya süreçlerini ifade eden katsayılar Einstein katsayıları olarak bilinir.

2.2.1 Kendiliğinden geçiş olasılığı

Oda sıcaklığında, tüm elektronları taban enerji düzeyinde olan bir grup atoma dışarıdan enerji uygulandığında, dıştaki yüksek kuantum seviyelerindeki elektronlar hızlı bir şekilde uyarılarak üst enerji seviyelerine pompalanırlar. Bu uyarılmış elektronlar pompalama kaynağı kaldırıldığında buldukları seviyenin yaşam

ömürüne bağlı olarak tekrar alt seviyelere inerler. Enerjinin korunumu kanuna göre her bir elektron alt enerji seviyesine inerken, ortama atomun enerji seviyeleri arasındaki enerji farkına eşit enerjide foton salar ($\Delta E_{ul} = E_u - E_l$). Üst enerji seviyesinin yoğunluğu N_u zamanın fonksiyonu olarak [14];

$$\frac{dN_u}{dt} = -A_{ul} N_u \quad (2.1)$$

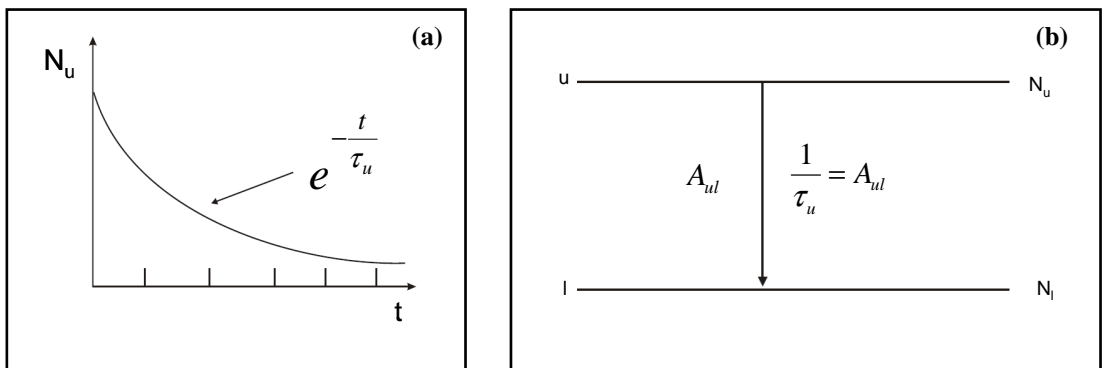
şeklinde değişir. Burada A_{ul} oranı sayı yoğunluğunun transfer edildiği katsayıdır ve ışımalı geçiş oranı veya ışımalı kendiliğinden geçiş olasılığı olarak bilinir (1/saniye birimlerinde). Eşitlik (2.1)'in çözümü;

$$N_u = N_u^0 e^{-A_{ul} t} \quad (2.2)$$

şeklindedir ve N_u^0 başlangıç durumunda üst (u) seviyenin sayı yoğunluğudur. Yoğunluğun zamanla değişimi Şekil 2.1'de görüldüğü gibidir ve τ_u üst (u) seviyenin yaşam ömrü olmak üzere, ışımalı kendiliğinden geçiş katsayısı ile arasındaki ilişki;

$$\frac{1}{\tau_u} = A_{ul} \quad (2.3)$$

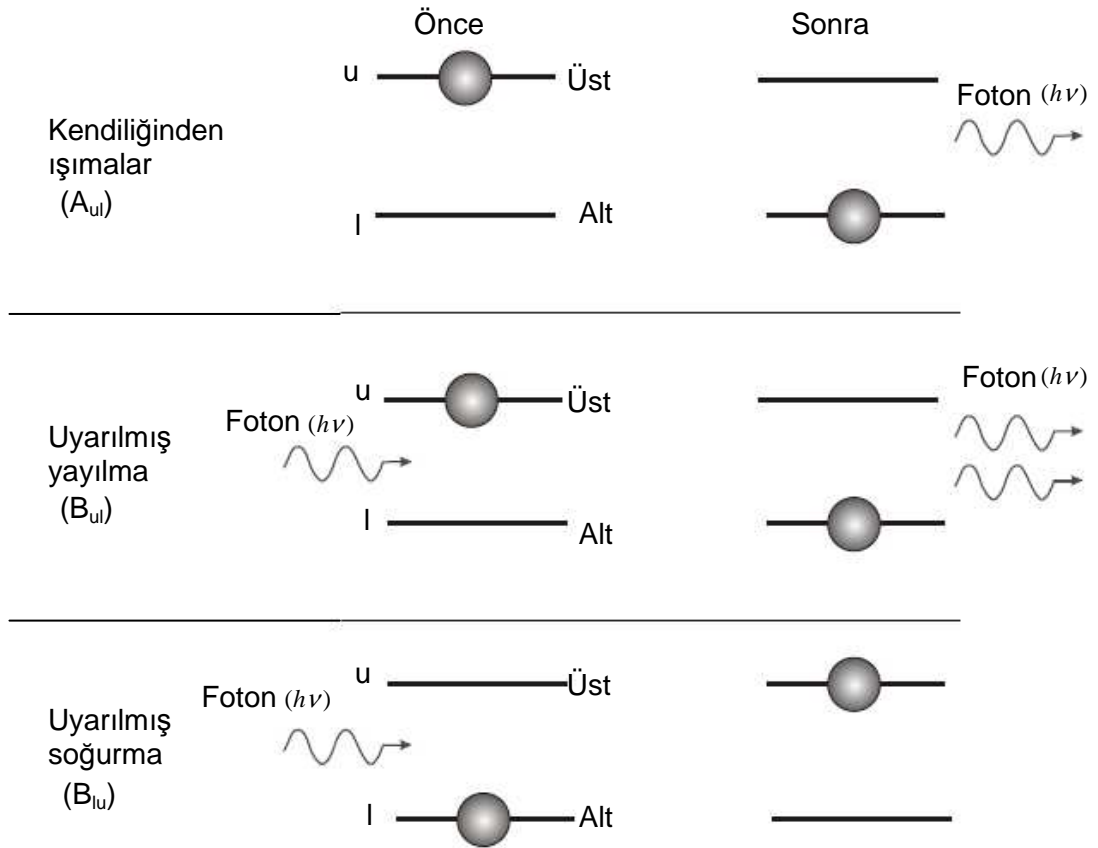
şeklindedir.



Şekil 2.1: (a) Atomun üst enerji seviyesinin yoğunluğunun zamanın bir fonksiyonu olarak değişimi. (b) Işımalı kendiliğinden geçiş olasılığı geçişin gerçekleştiği üst enerji seviyesinin yaşam ömrüne bağlıdır.

2.2.2 Soğurma ve uyarılmış ışımaya olasılığı

Atomun uyarılmış seviyeleri arasında, dışarıdan hiçbir etki olmaksızın meydana gelen kendiliğinden ışımaya olasılığının yanında soğurma ve uyarılmış ışımaya olma olasılıkları da vardır. Şekil 2.2’de atomun enerji seviyeleri arasında meydana gelen ışımaya süreçleri görülmektedir.



Şekil 2.2: Atomun enerji seviyeleri arasındaki olası ışımaya geçişler: Kendiliğinden ışımaya, soğurma ve uyarılmış ışımaya.

Soğurma yolu ile bir foton bir elektronu düşük enerjili l seviyesinden yüksek enerjili u seviyesine uyarabilirse, aynı zamanda bir foton u seviyesindeki bir elektronu l seviyesine indirmek için uyaracaktır. Soğurma durumunda foton yok olacak ve enerji soğurma işlemi yapan elektrona aktarılacaktır. Uyarılma durumunda yada uyarılmalı yayılma durumunda enerjinin korunması için gelen foton ile aynı enerjide (veya frekansta), ve momentumu korumak için aynı doğrultu ve fazda ortama bir foton

yayılır. Böyle bir uyarmalı yayılma işlemi iki düzey arasındaki sayı yoğunluğunu ısısız dengede tutmak için meydana gelir.

Isısız denge durumunda, ele alınan bir grup atomun uyarılmış seviyelerinin yoğunlukları arasındaki ilişki Boltzmann dağılımı ile verilir [1];

$$\frac{N_u}{N_l} = \frac{g_u}{g_l} e^{-(E_u - E_l)/k_B T} = \frac{g_u}{g_l} e^{-\Delta E_{ul}/k_B T} \quad (2.4)$$

burada N_u ve N_l sırasıyla atomun üst (u) ve alt (l) uyarılmış seviyelerinin sayı yoğunluklarını, g_u ve g_l sırasıyla üst ve alt enerji seviyelerinin istatistiksel ağırlıklarını ve ΔE_{ul} seviyeler arasındaki enerji farkını gösterir. Isısız dengede, birim frekans başına ışınım enerji yoğunluğu $u(\nu)$; kara cisim ifadesi ile verilir [1];

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3 [\exp(h\nu/k_B T) - 1]} \quad (2.5)$$

c ; ışığın hızı, h ; Planck sabiti, ν ; ışınım frekansı ve $k_B T$ ortamın sıcaklığıdır. Isısız denge prensibine göre, alt seviyeden (l) üst seviyeye (u) geçiş yapan elektronların oranları toplamı, üst seviyeden (u) alt seviyeye geçiş yapan elektronların oranına eşittir. Isısız dengede ışınım süreçleri için,

$$N_u A_{ul} + N_{ul} B_{ul} u(\nu) = N_l B_{lu} u(\nu) \quad (2.6)$$

yazılır. Burada A_{ul} ; kendiliğinden ışınım olasılığı, B_{ul} ; uyarılmış ışınım için Einstein katsayısı ve B_{lu} ; soğurma için Einstein katsayısıdır. Eşitlik (2.4) ve Eşitlik (2.6) düzenlenirse,

$$u(\nu) = \frac{A_{ul}}{B_{ul}} \left(\left[\frac{g_l B_{lu}}{g_u B_{ul}} \right] e^{h\nu_{ul}/k_B T} - 1 \right)^{-1} \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada $h\nu_{ul} = E_u - E_l$ dir. Eşitlik (2.5) ve Eşitlik (2.7)'den;

$$A_{lu} = \frac{8\pi h \nu_{lu}^3}{c^3} B_{ul} \quad \text{ve} \quad g_l B_{lu} = g_u B_{ul} \quad (2.8)$$

şartları gerçekleştiğinde (2.5) ve (2.7) eşitlikleri geçerlidir. Bu durum ısısal denge prensibi olarak bilinir [1].

2.3 Bir Lazer Üretmek İçin Gerek ve Yeter Şartlar

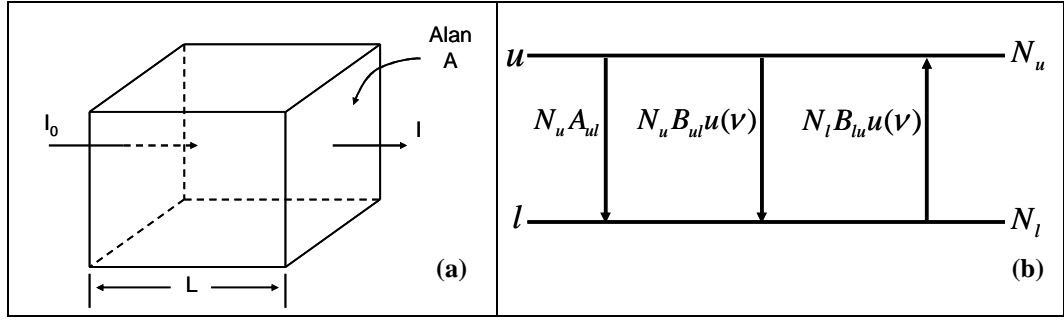
Bir lazer üretmek için gerek şart, seviyeler arasında sayı yoğunluğu tersinimi oluşturmak ve kazanç elde etmektir. Sayı yoğunluğu tersinimi elde etmek için kontrol edilmesi gereken en önemli süreçler atomların bulunduğu ortamda gerçekleşen soğurma ve kazancın göstergesi olarak ortamdaki foton sayısının kuvvetlenmesidir. Bu şartlar sağlandıktan sonra elde edilen demetin lazer ışığı olarak nitelendirilebilmesi için oluşan demetin şiddetinin doyuma ulaşması yeter şarttır.

2.3.1 Soğurma ve kazanç

Frekans ν ve frekans aralığı $\Delta\nu$ olan, birim frekans başına şiddeti $I(\nu)$ olan bir ışık demeti, L kalınlıklı, tesir kesit alanı A ile gösterilen bir ortama girdiğinde (Şekil 2.3 (a)) demetin şiddeti;

$$I = I(\nu)\Delta\nu \quad (2.9)$$

olarak tanımlanır. Böyle bir ortamda bulunan atomlar, üst (u) ve alt (l) enerji seviye yoğunlukları sırasıyla N_u ve N_l olmak üzere (Şekil 2.3 (b)), ortama girmeden önceki şiddeti I_0 olan bir demet üzerine etki ederek demetin şiddetini değiştirirler.



Şekil 2.3: (a) Uzunluğu L ve alanı A olan soğurabilen bir materyal üzerine I_0 şiddeti ile gelen ışık. (b) İki seviyeli sistemin enerji seviyeleri arasındaki süreçler: kendiliğinden ışıma, uyarılmış ışıma ve soğurma.

Birim zamanda birim hacim başına bu u ve l seviyeleri arasında olan süreçlerin sayısı:

$$N_l B_{lu}(\nu) \Delta \nu u(\nu) = N_l B_{lu}(\nu) I(\nu) \Delta \nu / c \quad (\text{yukarı}) \quad (2.10)$$

$$= N_l B_{lu}(\nu) I / c$$

$$N_u B_{ul}(\nu) \Delta \nu u(\nu) = N_u B_{ul}(\nu) I(\nu) \Delta \nu / c \quad (\text{aşağı}) \quad (2.11)$$

$$= N_u B_{ul}(\nu) I / c$$

ile verilir. Birim hacimde birim zamanda aşağı geçişlerin sayısı ile birim zamanda yukarı geçişlerin sayısı arasındaki farkın her geçiş başına foton enerjisi ile çarpımı, birim zamandaki enerji miktarını verir;

$$[I(z + dz) - I(z)] dA = [N_u B_{ul}(\nu) \Delta \nu u(\nu) - N_l B_{lu}(\nu) \Delta \nu u(\nu)] h \nu dA dz \quad (2.12)$$

$$= [N_u B_{ul}(\nu) I / c - N_l B_{lu}(\nu) I / c] h \nu dA dz$$

$$= [N_u B_{ul}(\nu) - N_l B_{lu}(\nu)] \frac{h \nu I dA dz}{c}$$

burada $dI = I(z + dz) - I(z)$ olarak tanımlanırsa,

$$\frac{dI}{dz} = [N_u B_{ul}(\nu) - N_l B_{lu}(\nu)] \frac{h \nu}{c} I \quad (2.13)$$

elde edilir. Bu denklemin genel çözümü,

$$I = I_0 e^{g(\nu)z} \quad (2.14)$$

şeklindedir, buradaki $g(\nu)$ kazanç katsayısıdır ve

$$g(\nu) = [N_u B_{ul}(\nu) - N_l B_{lu}(\nu)] \frac{h\nu}{c} \quad (2.15)$$

ile ifade edilir [1] ve birimi m^{-1} (MKS sisteminde).

2.3.2 Sayı yoğunluğu tersinimi

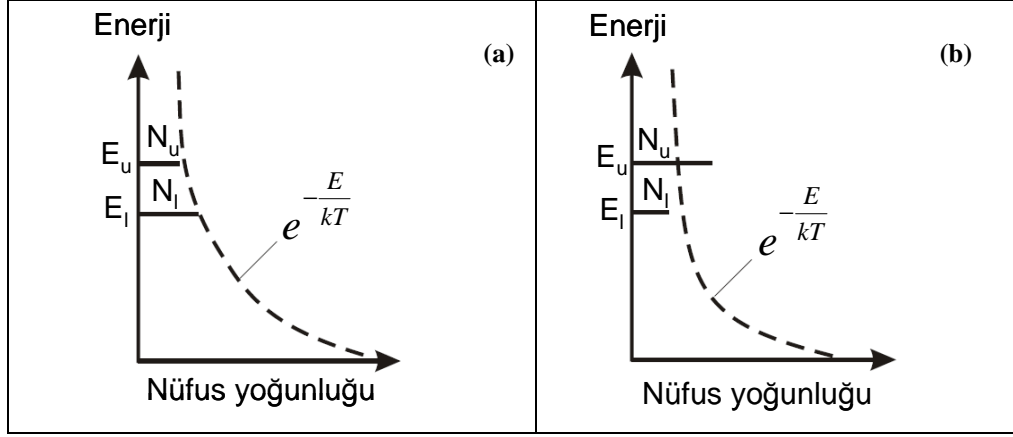
Sayı yoğunlukları N_u ve N_l olan enerji seviyelerine sahip atomların bulunduğu z uzunluklu bir ortama giren demetin büyümesi;

$$I = I_0 e^{\sigma_{ul} [N_u - (g_u / g_l) N_l] z} \quad (2.16)$$

ile verilir. Bu eşitliğin üstel değeri pozitif olduğunda demetin şiddeti artar ve güçlenme süreci gerçekleşir, üstel ifade negatif olduğunda ise demetin şiddeti azalır ve soğurma meydana gelir. Uyarılmış ışımaya tesir kesiti σ_{ul} ve z mesafesi her zaman pozitif değerler alacağından, seviyeler arasındaki kuvvetlenme ancak,

$$N_u > \frac{g_u}{g_l} N_l \quad (2.17)$$

şartı sağlandığında gerçekleşir [1]. Bu durum üst seviyenin yoğunluğunun alt seviyenin yoğunluğundan fazla olduğu durumlara karşılık gelir ve ‘sayı yoğunluğu tersinimi’ olarak adlandırılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: (a) ısısal denge durumunda, (b) sayı yoğunluğu tersinimi olduğu durumda, u ve l seviyeleri arasındaki sayı yoğunluk dağılımı.

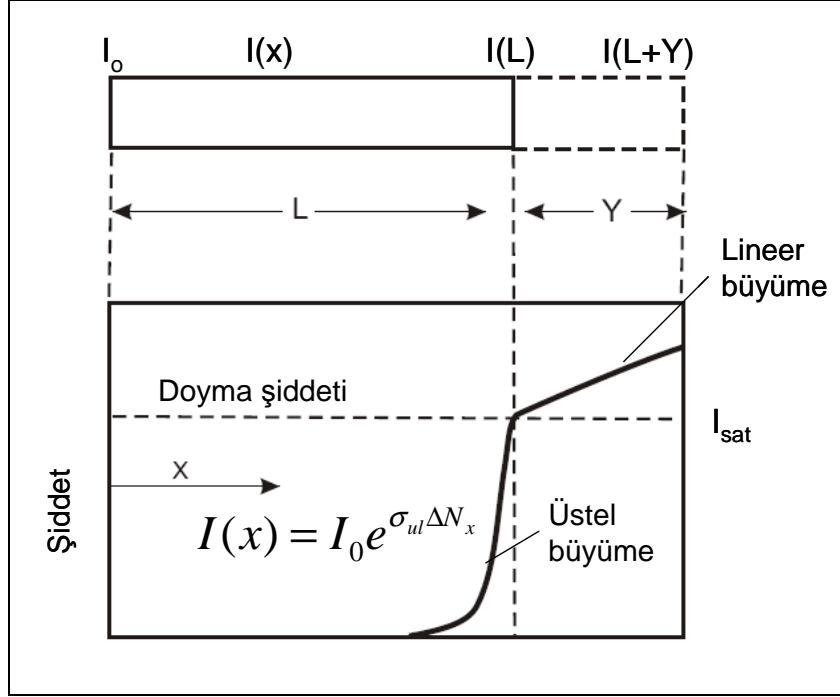
Bir lazerin olabilmesi için sayı yoğunluğu tersinimi gerekli şarttır fakat yeterli değildir. Elde edilen ışın demetinin doyma şartını sağlaması gerekir.

2.3.3 Doyma şiddeti

Sayı yoğunluğu tersiniminin var olduğu ve Eşitlik (2.16) deki üstel ifadenin pozitif olduğu, yeterli büyümeyi sağladığı bir durumda; kazanç ortamının uzunluğu artırılarak I şiddetinin uyarılmış yayımlardan dolayı üstel olarak artması istenirse, demetin ulaştığı şiddet değeri belli bir noktadan sonra üst seviyede depolanan enerjinin yetersiz kalması nedeniyle doğrusal olarak artmaya devam edecektir (Şekil 2.5). Bu nedenle doyma sürecinin meydana geldiği bir sınır söz konusudur. Demetin doyma ulaştığı şiddet ifadesi [1];

$$I_{doy} = \frac{h\nu_{ul}}{\sigma_{ul}(\nu)\tau_u} \quad (2.18)$$

ile verilir. Burada $\sigma_{ul}(\nu)$; uyarılmış ışına tesir kesiti, τ_u ; u seviyesinin yaşam ömrü, $h\nu_{ul}$ ise u seviyesi ve l seviyesi arasındaki enerji farkıdır.



Şekil 2.5: Kuvvetlenme uzunluğunun bir fonksiyonu olarak bir lazer demetinin üstel olarak büyüme ve doyması

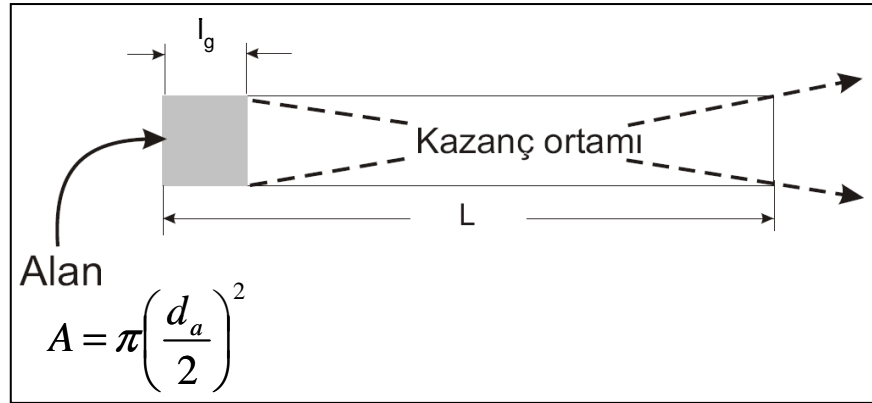
2.3.4 Bir lazer demetinin gelişmesi ve büyümesi

İstenen özelliklerde lazer elde edebilmek için gerek (sayı yoğunluğu tersinimi) ve yeter (doyma şiddeti) şartların yerine getirilmesi gerekir ki bunun için en önemli kriter, kazanç ortamında oluşan demetin istenen değerde kuvvetlenebilmesi için ortamda ne kadar süre bulunması gerektiğidir.

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi uzunluğu L , tesir-kesit alanı A ve çapı d_a olan silindirik bir kazanç ortamında; l_g bölgesinden başlayarak ilerleyen bir demetin L mesafesinin sonunda doyma şiddetine ulaşması için gereken koşullar;

$$\begin{array}{c}
 \text{Son} \\ \text{bölgeden} \\ \text{foton} \\ \text{Enerji/foton} \\ \text{kazanç} \\
 \hline
 I_g A N_u A_{ul} h \nu_{ul} \left(\frac{A}{4\pi L^2} \right) e^{\sigma_{ul}^H(\nu) N_u L} = \frac{h \nu_{ul}}{\sigma_{ul}^H(\nu) \tau_u} \quad (2.19) \\
 \hline
 \text{Işıma} \quad \text{Kati açı} \quad \text{alan} \quad \text{Doyma şiddeti} \\
 \text{oranı} \quad \text{kesri}
 \end{array}$$

ile hesaplanır [1].



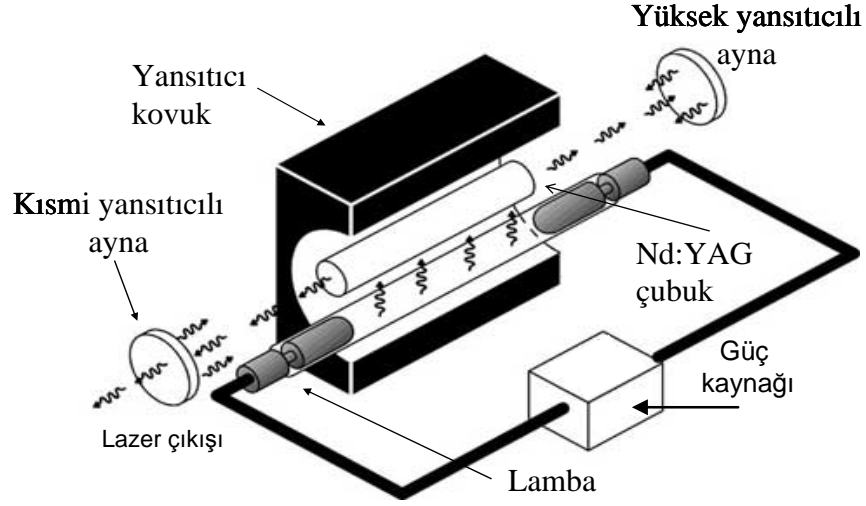
Şekil 2.6: Uzunluğu L , tesir-kesit alanı A ve çapı d_a olan silindirik bir kazanç ortamı.

Eşitlik (2.19) ifadesinde bozunma zamanı $\tau_u=1/A_{ul}$ ve A kesiti için $A=\pi(d_a/2)^2$ ve I_g mesafesi için $1/\sigma_{ul}(\nu)N_u$ yazılırsa;

$$e^{\sigma_{ul}(\nu)N_u L} = 16(L/d_a)^2 \quad (2.20)$$

elde edilir [1]. Bu ifadeye göre, sayı yoğunluğu tersinimi olan bir kazanç ortamında bir lazerin oluşabilmesi için demetin ortam içerisinde L mesafesi kadar yol alması gerekir. Bu mesafe, aynalar yardımı ile demetin ortam içerisinde gerektiği kadar gidip gelmesi sağlanarak elde edilebilir. Tipik bir Nd:YAG lazerinin kazanç ortamı

ve geri besleme sistemleri (kavite) Şekil (2.7)'de görülmektedir [15]. Flaş lambaları ile pompalanan kristal içinde demet oluşmaya başlar ve aynalar yardımı ile geri besleme sağlanır. Demet belli kazanç değerine ulaştığında kısmen geçirgen olan aynadan lazer çıkışı olmaya başlar.



Şekil 2.7: Tipik bir Nd-YAG lazerinin kazanç ortamı ve geri besleme (kavite) sistemleri [15].

2.4 Lazerlerin Kullanım Alanları

Günümüzde, normal ışık kaynaklarından farklı olmaları nedeniyle lazerler endüstri, sağlık, savunma gibi pek çok alanda oldukça sık olarak kullanılmaktadır. Sıkça kullanılan lazerler ve özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Günümüzde kullanılan lazerler ve özellikleri [16].

Kazanç Ortamı	Max. Ortalama Gücü(W)	Çalışma modu	Dalgaboyu (µm)
CO ₂	25,000	CW,P	9,6/10,6
Nd:YAG	1,800	CW,P	1,06/1,32
Excimer lazerler:			
F ₂	3	P	0,157
ArF	70	P	0,193
KrCl	20	P	0,222
KrF	160	P	0,248
XeCl	200	P	0,308
XeF	70	P	0,351
Katı-Hal lazerler:			
Cr:safir(yakut)	100	P	0,694
Ti:safir	20	P	0,68-0,95
Cr:alexandrite	20	P	0,72-0,79
Nadir toprak elementleri:			
Nd:glass	40	P	1,06
Nd:YLF	20	CW,P	1,05/1,32
Er:YAG	20	CW,P	2,94
Ho:YAG	20	CW,P	2,13
Er:YSGG	3	P	2,79
Metal Buharı Lazerleri:			
Bakır	100	P	0,511/0,578
Altın	3	P	0,628
İyon lazerler:			
Argon	50	CW	0,457/0,488 0,514/0,530
Kripton	8	CW	0,647/0,676/ 0,752
Karışık	20	CW	0,457///0,752
Boya lazerleri:			
Lamba pompalamalı	50 veya 100	P	0,4-1,0
Lazer pompalamalı	1	CW,P	0,4-1,0
DPSS lazerler:			
Nd:YAG	10	CW,P	1,06/1,32
Nd:YLF	10	CW,P	1,05/1,32
Yarı iletken lazerler:			
AlGaAs,diyot	1	CW,P	0,780-0,865

Tablo 2.1: Günümüzde kullanılan lazerler ve özellikleri (devam)[16].

AlGaAs,1Dsıralı	20	CW,P	0,780-0,865
InGaAs, diyot	0,1	CW,P	0,98
InGaAsP, diyot	0,1	CW,P	1,20-1,55
Kurşun tuzu	0,001	CW,P	3-30
Gaz lazerler:			
CO	10	CW	0,52//0,58
Nitrojen	0,3	P	0,337
HeCd	0,2	CW	0,325/0,442
HeXe	0,1	CW	2//3,51//4
HeNe	0,07	CW	0,544/0,594/ 0,612/0,633/ 1,15/1,52/3,39

2.4.1 Lazer demetini diğer ışık kaynaklarından ayıran özellikler

Lazerlerde, sadece frekansı $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ olan yani gelen foton ile aynı enerji ve frekansa sahip elektromanyetik dalga güçlendirilebilir, ν_0 kesin bir değere sahiptir ve çizgi genişliği olarak adlandırılır. Çizgi genişliği homojen veya homojen olmayan genişleme faktörü ile belirlenir. Sonuç olarak diğer ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında bu çizgi genişliği çok dardır. Lazer kovuklarında (cavity) sadece rezonans frekansında salınım meydana gelir. Bu, lazer çizgi genişliğinin daha da daralmasına neden olur. Bu daralma 10 kat büyüklükte olabilir. Bundan dolayı lazer ışıkları dalgaboyu bakımından saftırlar. Bu özelliğine tek renklilik (monochromatic) denir [17].

Bir elektromanyetik dalga içinde uzaysal ve zamansal olmak üzere iki türlü uyumluluk vardır. Herhangi bir zamanda bir elektromanyetik dalganın dalga cephesi üzerinde aralarında faz farkı bulunan iki nokta ele alındığında, zaman değişmesine rağmen bu iki nokta arasındaki faz farkı değişmiyorsa elektromanyetik dalganın mükemmel uyumlu olduğu söylenir. Dalga cephesi üzerinde sabit bir nokta ele alındığında eğer herhangi bir zamanda, zamanlar arasındaki faz farkı aynı kalıyorsa elektromanyetik dalganın zamansal gecikme periyodu altında zamansal uyumlu olduğu söylenir.

Lazer demetinin rezonans kovuk içerisinde gelmesinin ve dalgaların sadece optik eksen boyunca ilerleyip güçlenmesinin bir sonucu olarak lazer demeti, yüksek derecede yönelimlidir yani sapma açısı çok küçüktür.

Bir ışık kaynağının parlaklığı birim yüzey alanı başına, birim katı açı ile yayılan güç miktarı ile tanımlanır. Gücü P , dairesel demet kesit çapı D ve sapma açısı Θ olan bir demetin yayılma açısı $\pi\Theta^2$ olur ve lazer demetinin parlaklığı ;

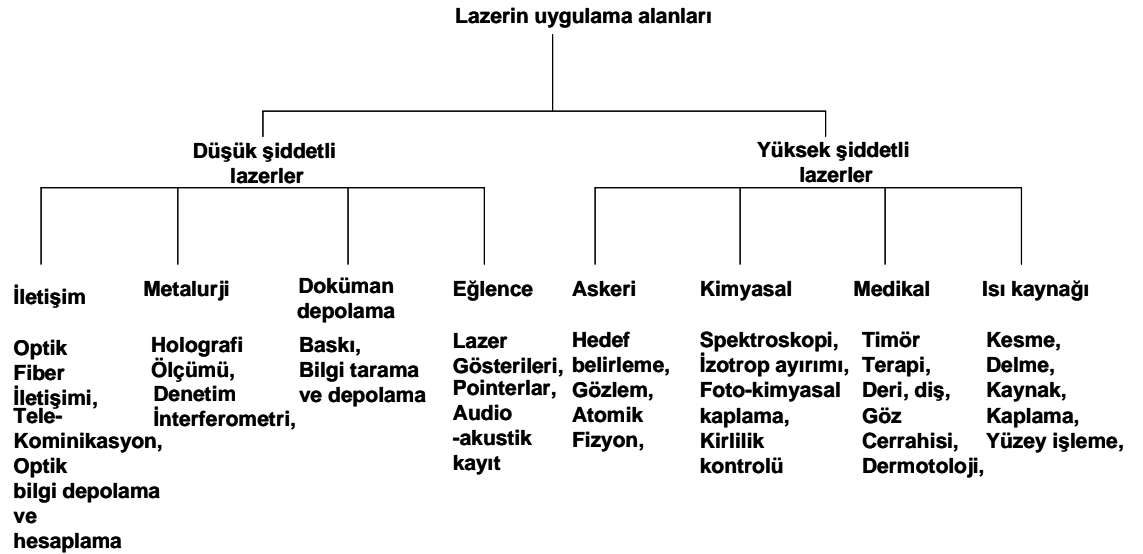
$$B = \frac{4P}{(\pi D \Theta)^2} \quad (2.21)$$

ile verilir [17].

2.4.2 Lazerlerin kullanım alanları

Lazer ışını uyumlu, spektral olarak saf ve yönlendirilebilir olmasından dolayı diğer ışık kaynaklarından çok farklıdır. Yakut lazerinden üretilen ilk atımlı lazer ile birlikte her geçen gün lazer çeşitleri ve kullanım alanları artmaktadır [18-20]. Bundan önceki bölümde verilen Tablo 2.1’deki lazerler özelliklerine göre çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Tablo 2.2’de lazerlerin kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 2.2: Lazerlerin kullanım alanları [21].

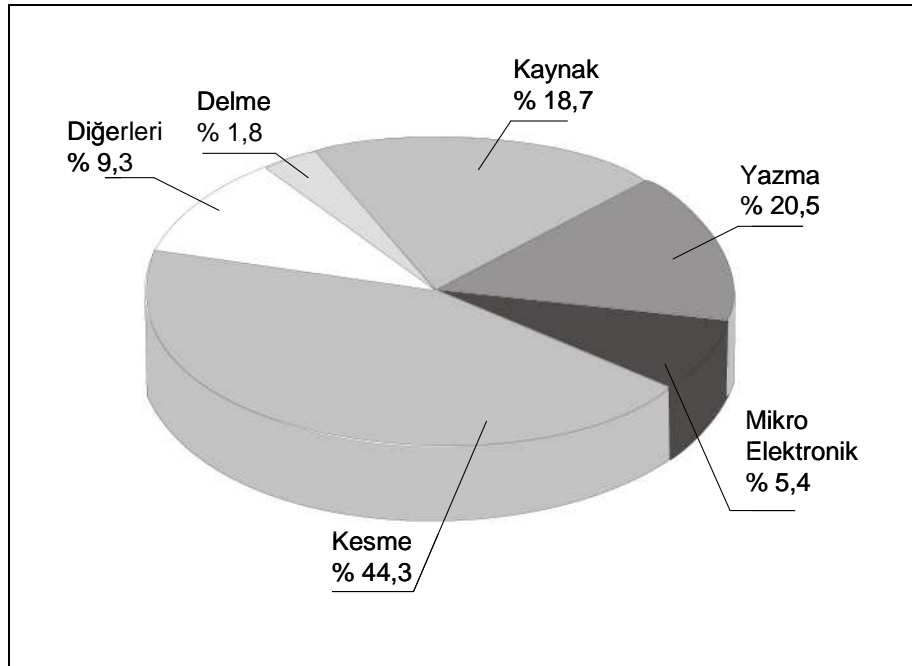


Nanosaniye atım uzunluğunda, Q anahtarlama tekniği kullanılarak üretilen ilk lazerin bugün geldiği nokta attosaniye (10^{-18}) mertebeleridir [22]. Savunma sanayinde kullanılan lazerler ülkelerin güvenliği için vazgeçilmez haline gelmiştir [23]. Biyolojide hücrelerin canlı olarak incelenmesinde kullanılabildiği gibi [24] medikal alanda ameliyatların gerçekleştirilmesinde de kullanılabilen [25] lazerler insan ömrünün uzamasına da katkıda bulunmaktadır.

2.4.3 Lazer ile malzeme işleme: Delme, kesme, kaynak

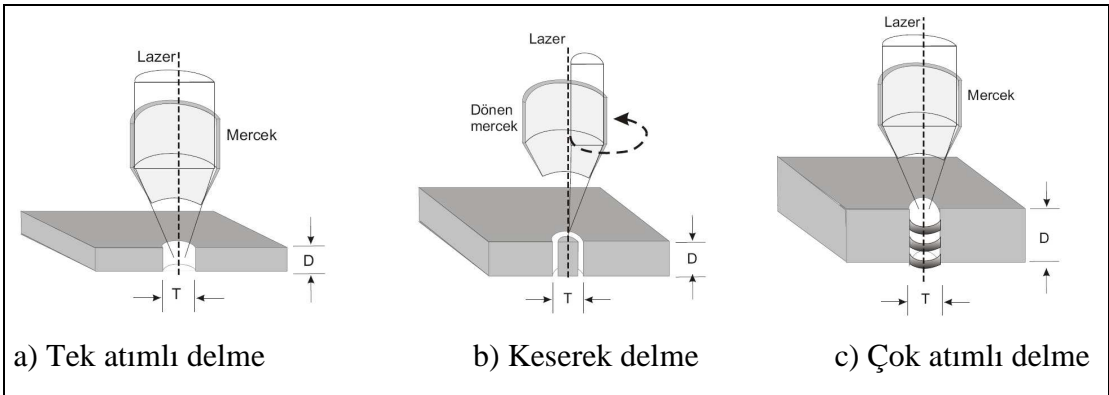
Lazerler yüksek yoğunluklu enerji kaynağı olarak özellikle, kesme, delme, kaynak, yüzey işleme, markalama, kaplama gibi alanlarda da sıklıkla kullanılırlar [26]. Son dönemlerde mikro boyutta yapıların çok fazla kullanımı ile lazerlere duyulan ihtiyaç daha da artmıştır. Yüksek işlem hızı, yüksek kalite, düşük ısıl zarar ve temiz bir işlem ortaya çıkarması gibi özelliklerinden dolayı lazerler diğer işlem çeşitlerine göre daha çok tercih edilmektedirler [27]. Tablo 2.3’de lazerin sanayide kullanım alanlarındaki yoğunluk gösterilmiştir.

Tablo 2.3: Lazerlerin kullanım alanlarındaki yoğunluk [28].



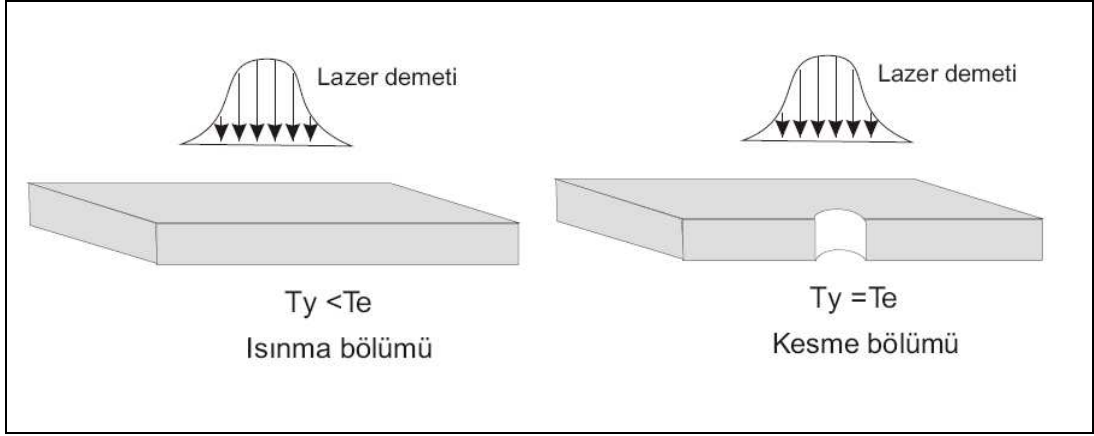
Lazer delme işlemi uçak sanayi, uzay sanayi, ve otomotive endüstrisi için çok önemli bir uygulamadır [29]. Özellikle jet uçakların soğutma sistemlerinin yapımı sırasında çok fazla küçük çaplı deliğe ihtiyaç vardır. Lazerler ile çok kısa sürede çok fazla delik delmek mümkündür. Bunu yanı sıra soğutma sistemlerinde kullanılan malzemeler ısıya dayanıklı malzemeler olduğu için diğer yöntemler ile bu işlemin gerçekleşmesi zaman ve daha masraflı bir hal almaktadır [30]. Malzeme yüzeyinden parça kopartabilecek bir çok çeşit lazer vardır. Bu lazerler kaynak işlemlerinde kullanılan lazerlerden biraz farklıdır. Çünkü delme ve kesme işlemlerinde kullanılan lazerlerin ışınması biraz daha fazla ve atım sürelerinin nispeten daha kısa olmalıdır. Örneğin Q-anahtarlı Nd:YAG lazerler enerji ve atım sürelerine bağlı olarak ince malzemeleri kesme ve ince filmleri delme işlemi için uygunken kaynak işlemleri için uygun değildir [16].

Lazer ile delme işlemlerinde kullanılan üç farklı teknik vardır. En basit yol tek lazer atımı kullanarak malzeme yüzeyinde delik açmaktır. Bu teknik genelde çapı 1 mm den küçük delikler delebilmek için kullanılır. Bu yöntemle elde edilen deliklerin derinliği 3mm de sınırlı kalmaktadır. İkinci teknik, keserek daha geniş delikler elde etme yöntemidir. Bu teknik kullanılarak elde edilen deliklerin çapı 10 mm ye kadar çıkabilir. Üçüncü yöntem ise çok sayıda kısa süreli atımı malzeme yüzeyine göndererek delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem kullanılarak çapı 1 mm den küçük ve 20 mm derinliğinde delikler oluşturmak mümkündür. Şekil 2.8'de 3 farklı delme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Lazer ile delme işlemleri sırasında kullanılan; tek atımlı delme, keserek delme ve çok atımlı delme işlemleri [31].

Lazer delme işleminde odaklanma üniteleriyle malzemeye odaklanan lazer malzemede ısınmaya neden olur. Lazer ile delme işlemlerinde ısınma ve malzeme çıkarma işlemi olarak iki ana mekanizma gerçekleşmektedir. Isınma işlemi sırasında malzemenin yüzeyindeki ısı faz değişim sıcaklığına kadar artar. Lazer demetinin şiddeti oldukça yüksek olduğu için bu süre oldukça kısadır. Isınma işlemi sırasında faz değişimi olmadığı için delik oluşmaz. Yüzey sıcaklığı erime noktasına ulaştığında delme işlemi başlar. Malzeme çıkarma işlemi sırasında erimiş malzemenin dışarı atılması ile delik derinliği artırılır [30]. Şekil 2.9’ da ısınma ve malzeme çıkarma işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Isınma ve malzeme çıkarma işlemi [30].

Kesme işlemleri, delme işlemine ek olarak lazer demetinin veya malzemenin hareket ettirilmesi ile meydana gelir. Kesme işleminde amaç, ısıdan etkilenmiş bölgenin ve malzemede oluşabilecek eğrilikleri minimuma indirmek için malzemeyi olabildiğince hızlı bir şekilde buharlaştırmaktır. Lazer ile kesme işlemlerine yardımcı olmak ve optik aksağımı saçılmalardan korumak için gaz kullanımına ihtiyaç vardır. Kesme işlemi sırasında kullanılan gaz ısıveren (ekzotermik) bir reaksiyona neden olduğunda kesme işlemi için gerekli olan enerjinin büyük kısmı elde edilmiş olur. Lazer metalin sıcaklığını arttırmak için çok önemlidir ve bu sayede işlem hızı arttırılmış olur. Gaz aynı zamanda kesme sırasında oluşan erimiş metali dışarı atma işini de yapar [32,33].

Lazer ile malzeme işleme yöntemlerinden en çok kullanılan ve en eski tekniklerinden biride sürekli veya atımlı lazerler kullanılarak metallerin birleştirilmesi işlemidir.

Günümüzde otomobil ve uzay endüstrisinde metal levhaların uzaktan birleştirilmesi işlemlerinde ısı kaynağı olarak lazerler kullanılmaktadır. Diğer tekniklere göre lazerler organik/inorganik ve aynı/farklı metallerin yüksek doğrulukta birleştirilmesinde kullanılır [21]. Çok yönlülüğü ve verimliliği açısından sadece elektron demet kaynağı ile kıyaslanabilir. Fakat elektron demet kaynağı gibi vakum ortamına ihtiyaç duymaması lazerin önemli bir avantajıdır. Diğer tekniklere göre kaynak genişliğinin küçük olması, yüksek verimlilikte hızlı kaynak yapması, metalde daha az eğilmeye neden olması, ısıdan etkilenmiş bölgenin çok az olması ve Al/Mg gibi alaşımların kaynağında da kullanılabilmesi açısından lazerler kaynak işlemlerinde çok fazla tercih edilirler [21].

Lazerlerin kaynak işlemlerine bu nedenle uygun olduğu uzun çalışmalar sonucu ortaya çıkmıştır. Tablo 2.3 te konu ile ilgili yapılan çalışmaların küçük bir tarihsel sıralaması görülmektedir. Lazer ile kaynak işlemi hakkında detaylı bilgi BÖLÜM 3'te verilecektir.

Tablo 2.4: Lazerler ile kaynak işleme konusunda yapılan çalışmaların kısa bir tarihsel sıralaması.

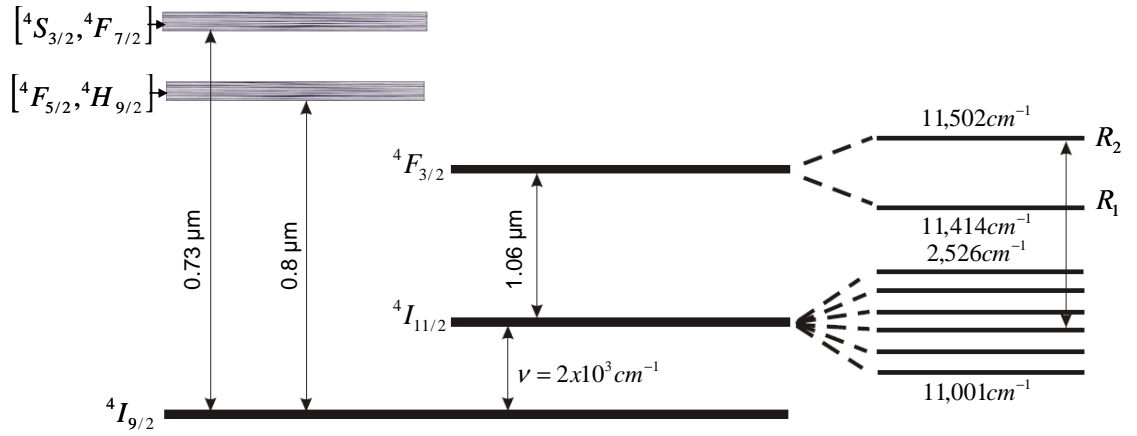
Malzeme	Kullanılan lazer	Konu	Yıl	Referans
Al-Fe-V-Si alaşım	CW-CO ₂	Kaynak bölgesinin mikroyapısal karakterizasyonunda parametrelerin etkisi	1995	[34]
SiC takviyeli Ti alaşım	CW-CO ₂	Kaynak numunelerinin uygulanabilirliği ve mekanik özellikleri	1995	[35]
Paslanmaz çelik	CW-CO ₂	Farklı yer çekim ortamlarında kaynak karakterizasyonu	1995	[36]
Paslanmaz çelik, kovar, altın	Yarıiletken lazer	Paketleme işleminde hata oluşumunun karakterizasyonu	1996	[37]
8090 Al-Li alaşım	CW-CO ₂	Kaynağın mikroyapısı ve mekanik karakterizasyonu	1996	[38]
Ti6Al4V	CW-CO ₂	Kaynak numunelerinin yorgunluk ve sertlik özellikleri	1997	[39]
AA 1100 Al alaşım	Atımlı Nd:YAG	Kaynaktaki lazer parametrelerinin etkisi	1997	[40]
Paslanmaz çelik	CW-CO ₂	Kaynak parametrelerinin füzyon bölgesine etkisi	1997	[41]
Paslanmaz çelik ve Titanyum	CW-CO ₂	Kaynak işleminde plazma bulutunun karakterizasyonu	1997	[42]

Tablo 2.4: Lazerler ile kaynak işleme konusunda yapılan çalışmaların kısa bir tarihsel sıralaması (devam).

Yüksek karbonlu çelik	CW-CO ₂ ve diod lazer	Lazer parametrelerinin kaynak kalitesindeki etkisi	1999	[43]
6061-T6 Al-Mg-Si alaşım	CW-CO ₂	HAZ'ın mikroyapısı ve özellikleri	1999	[44]
SiC+Al-6061 komposit+Ti	CW-CO ₂	Lazer kaynağın alaşımlara uygulanabilirliği	2000	[45]
C95800 Ni-Al Bronz	Nd:YAG	Lazer ve işlem parametrelerinin etkisi	2000	[46]
Ni+Au-Ni kaplama çelik	Atımlı Nd:YAG	kaynak işleminde Ni veya Au/Ni kaplamanın etkisi	2001	[47]
Çelik	CW-lazer	Marangoni etkisinin kaynak işlemi üzerindeki etkisi	2001	[48]
TiNi alaşımlar	CW-CO ₂	Kaynakların paslanmazlık, mekanik ve şekil özellikleri	2001	[49]
Ti6Al4V	Atımlı Nd:YAG lazer	Anahtar deliği oluşumu ve lazer gücünün kaynak derinliğine etkisi	2001	[50]
AZ91 ve AM50 alaşımlar	CW-CO ₂	Uygulanabilirlik ve kaynak karakterizasyonu	2001	[51]

2.5 Nd:YAG Lazer

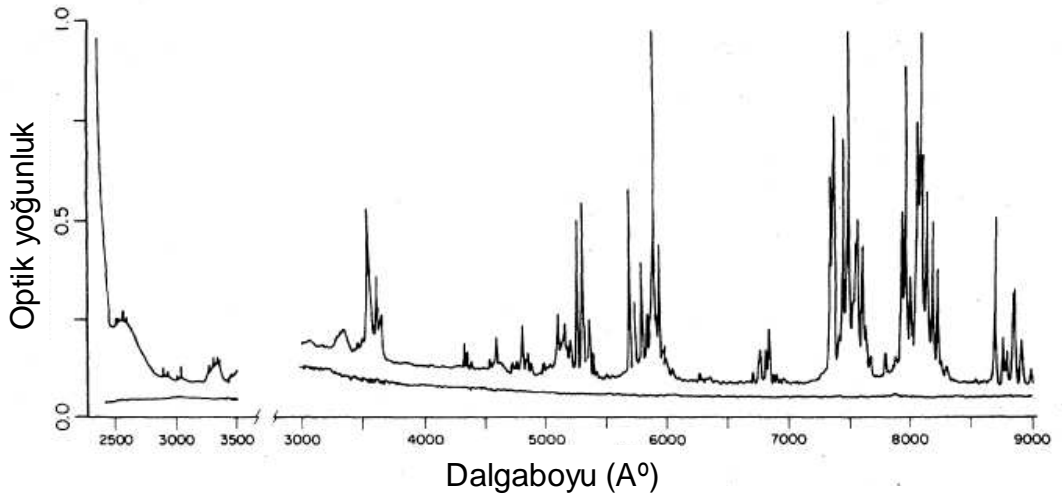
Bu çeşit lazerler en popüler katı-hal lazerleridir. Kazanç ortamındaki ana kristal Y₃Al₅O₁₂ (YAG, Yttrium Aliminyum Garnet) dır. Bu kristalde bazı Y³⁺ iyonları Nd³⁺ iyonları ile yer değiştirilir. Bunun yanı sıra kazanç ortamı fluoride (YLİF₄) veya vanadate (YVO₄) maddelerine ek olarak fosfat veya silikat camlar içerir [52]. Tipik katkı oranı yaklaşık % 1 dir. Yüksek dereceli katkı oranı, Nd³⁺ iyonlarının çaplarının Y³⁺ iyonlarından büyük olmasından dolayı, floresan zamanını kısaltmakta, çizgi genişliğini arttırmakta ve kristalde gerilmeye neden olmaktadır [52]. Tüm bu etkilerde optik kaliteyi düşürmektedir. Nd:YAG lazeri dört enerji düzeyli bir sistemdir. Şekil 2.10'da Nd:YAG kristaline ait enerji düzeylerinin şeması gösterilmektedir [52].



Şekil 2.10: Nd:YAG lazeri enerji düzeyleri [52].

Lazer geçişi $4F_{3/2}$ enerji düzeyinin R_2 bileşeninde başlar ve $4I_{11/2}$ düzeyinin Y_3 bileşeninde biter ve bu geçiş 1064 nm dalgaboyunda lazer ışın salar. Oda sıcaklığında $4F_{3/2}$ düzeyinin nüfus yoğunluğunun sadece %40 ı R_2 seviyesindedir, geri kalan %60 lık kısım Boltzman yasasına göre daha düşük alt enerji düzeyi olan R_1 seviyesindedir[52]. Işımlar sadece R_2 seviyesinde olduğu için R_2 seviyesindeki nüfusu ısısal geçişler ile R_1 tarafından tekrar doldurulur.

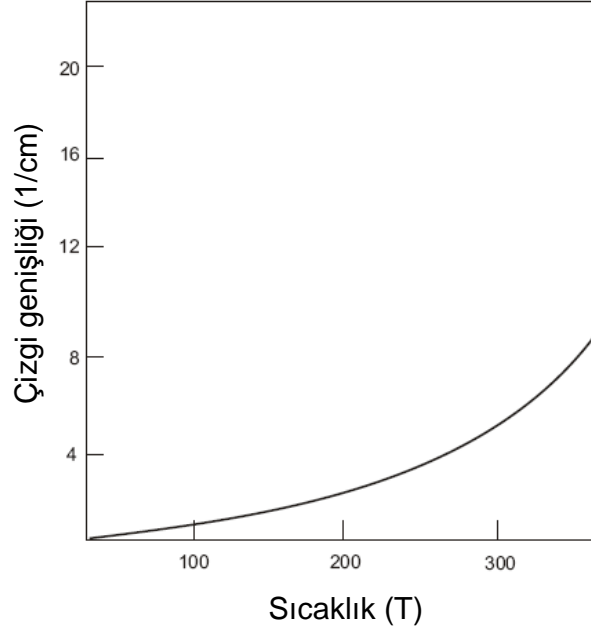
Şekil 2.10'da belirtilen enerji düzeyleri Nd^{+3} iyonlarının 4f elektronlarından ortaya çıkmaktadır. Her düzey için sembol karakterizasyonu $^{2S+1}L_J$ formundadır. Burada S toplam spin kuantum sayısı, J toplam açısal momentum kuantum sayısı, ve L yörünge kuantum sayısı. Böylece $4I_{9/2}$ taban enerji düzeyi $2S+1=4$ ($S=3/2$), $L=6$, ve $J=L-S=9/2$ ye karşılık gelmektedir. Her bir enerji düzeyi m_j kuantum sayısına karşılık gelecek şekilde birim adımlarla $-J$ den $+J$ ye kadar dejenere olur. Nd:YAG kristal alanının oktahedral simetri yapısında stark etkisi olduğu durumda $|m_j|$ değerli düzeyler aynı enerjiye sahip olurlar, ve her $^{2S+1}L_J$ düzey iki kat dejenere olarak alt düzeylere bölünürler. Böylece $4I_{11/2}$ ve $4F_{3/2}$ düzeyleri sırası ile 6 ve 2 adet alt düzeye bölünür. Nd:YAG kristalinin iki temel pompalama bandı $730 \text{ ve } 800 \text{ nm}$ dalgaboyların da meydana gelir. Özellikle üst soğurma bandı (800nm) flaş lambalarında önemli rol oynamaktadır. Nd:YAG kristaline ait soğurma bandı Şekil 2.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.11: 0.5 cm, 300K de Nd-YAG kristaline ait soğurma bandı [53].

Bu üst seviyeler hızlı ışısız bozunmalar ile ${}^4F_{3/2}$ seviyesi ile birleşir buradan I seviyelerine ışımali geçişler meydana gelir. (${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$,...) bu bozunmanın hızı oldukça yavaştır ($\sim 230 \mu s$).

Geçişlerden anlaşılacağı gibi ${}^4F_{3/2}$ enerji düzeyinden I alt enerji seviyelerine bir çok lazer geçişi mevcuttur. Bu geçişlerden ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ geçişi en güçlü olanıdır, ${}^4I_{11/2}$ düzeyinden ${}^4I_{9/2}$ taban enerji düzeyine çok hızlı (yüzlerce pikosaniye) ışısız bozunma meydana gelir ve bu iki seviye arasındaki ısısal denge çok kısa bir sürede tamamlanmış olur. ${}^4I_{11/2}$ ve ${}^4I_{9/2}$ düzeyleri arasındaki enerji farkı her zaman kT den büyük olduğu için boltzman istatistiğine göre ${}^4I_{11/2}$ enerji düzeyinin her zaman boş olduğunu düşünmek iyi bir yaklaşıklıkır. Diğer ışımalarda olduğu gibi $\lambda=1.064 \mu m$ olağan dalgaboyundaki ışımalarda örgü fononları ile etkileşim nedeni ile oda sıcaklığında lazer geçişi homojen olarak genişler. Bu genişleme $T=300 K$ sıcaklığında $\Delta\nu \sim 4.2 \text{ cm}^{-1} = 126 \text{ GHz}$ e karşılık gelir. Şekil 2.12'de $1.064 \mu m$ dalgaboyunda Nd:YAG lazerinin çizgi genişliğine ait grafik belirtilmiştir.



Şekil 2.12: Nd:YAG lazerine ait sıcaklık çizgi genişleme eğrisi [52].

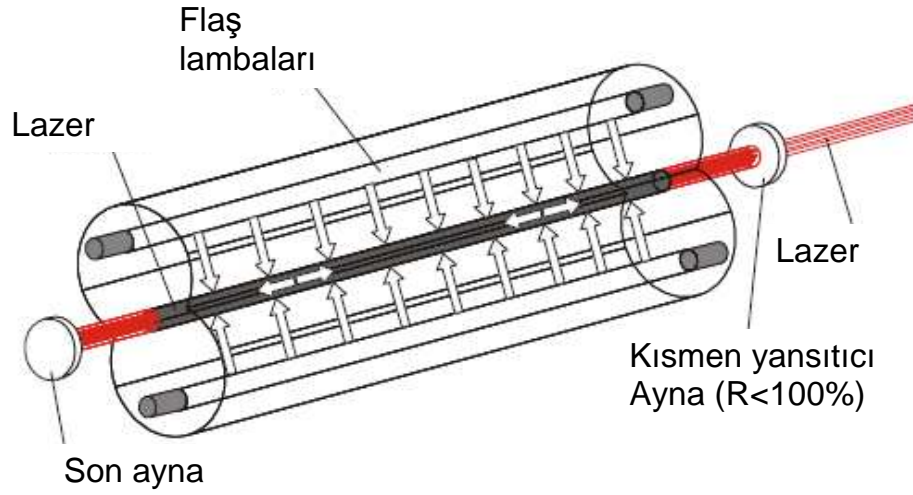
Bu genişleme, pasif mod kilitleme tekniği ile Nd:YAG kristalinde 5 ps süreli atımlar elde etme imkanı vermiştir. Üst yaşam ömrünün uzun olması (230 μ s) Nd:YAG lazerini Q-anahtarlaması için uygun hale getirmektedir. Tablo 2.5’de oda sıcaklığında Nd:YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler verilmiştir [1].

Tablo 2.5: Nd-YAG lazerine ait optik ve spektroskopik parametreler [1].

Lazer dalgaboyu(λ_{ul})	1.064 μ m
Lazer geçiş olasılığı (A_{ul})	$4.3 \times 10^3/s$
Üst seviye yaşam ömrü (τ_{ul})	230 μ s
Uyarılmış yayılma kesit alanı(σ_{ul})	$6.5 \times 10^{-23}m^2$
kendiliğinden yayılma çizgi genişliği	$1.2 \times 10^{11}/s$
kazanç bant genişliği, FWHM ($\Delta\nu_{ul}$)	$\Delta\nu_{ul}=0.45nm$
Tersinme yoğunluğu (ΔN_{ul})	$1.6 \times 10^{23}/m^3$
Küçük sinyal kazanç katsayısı(g_0)	10/m
Lazer kazanç ortamı uzunluğu (L)	0.1-0.15m
Tek geçişte kazanç ($e^{\sigma_{ul}\Delta N_{ul}L}$)	2-20
Katkı yoğunluğu	$1.4 \times 10^{26}/m^3$
kazanç ortamı kırılma indisi	1.82
Çalışma sıcaklığı	300 K
Lazer çubuğunu ısısal iletkenliği	13W/m-K
Lazer çubuğunu ısısal genleşme katsayısı	$6.9 \times 10^{-6}/K$
Pomplama metodu	optik (flash lambası veya lazer)
Pomplama bandı	300-900nm
Çıkış gücü	tepe noktaları 810nm veya 750nm
Çalışma modu	1 Joule/atım tekli veya çoklu mod

Nd: YAG lazerleri sürekli veya atımlı modta çalışabilirler, ve hem lamba hem de AlGaAs yarı iletken lazerleri ile pompalanabilirler. Nd:YAG lazerine ait bir resonatör Şekil 2.13'deki gibidir.

Bilindiği üzere elipslerin iki merkezi vardır elipslerin bu özelliğinden yararlanılarak sistem merkezlerin birinde flaş lambası diğerinde de kristal olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 2.13'de belirtilen sistemde iki tane flaş lambası kullanılmıştır. İstenilen güce ulaşabilmek için elipslerin ve de flaş lambalarını sayısı arttırılabilir.



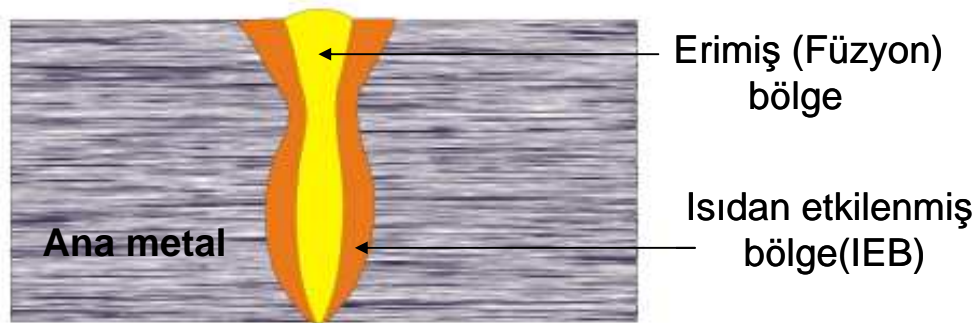
Şekil 2.13: Nd:YAG lazer kovuğu.

BÖLÜM 3 LAZER İLE MALZEME İŞLEME: KAYNAK

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. Bu bölümde; lazer ile kaynak yöntemleri, kaynak işlemi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar ve bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan atımlı Nd-YAG lazeri ile dikiş kaynağı ve lazer parametrelerinin dikiş kaynağına etkileri tartışılacaktır.

3.1 Giriş

Lazer ile yapılan kaynak işlemi, maddelerin birbirlerine değen yüzeyleri eritildikten sonra soğumaya bırakılması ile gerçekleştirilen bir füzyon işlemidir [30]. Lazer ile kaynak işlemi sırasında birbirinden farklı üç bölge oluşur (Şekil 3.1). Birinci bölge ana metaldir ve kaynak yapılan metali içeren bu bölge kaynak işlemi süresince hiçbir değişime uğramaz. İkinci bölge füzyon bölgesidir (eritilmiş metal), kaynak işlemi süresince eritilen 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 3.1: Lazer ile kaynak işlemi sırasında oluşan bölgeler: Ana metal, Erimiş bölge, ısıdan etkilenmiş bölge [54].

Lazer demetinin yüksek enerji yoğunluğu sağlayabilmek için küçük bir alana odaklanabilir [55] olması kaynak işlemlerinde tercih edilen bir alet olmasını sağlar. Tablo 3.1’de farklı kaynak işlemleri için güç yoğunluklarını görülmektedir.

Tablo 3.1: Farklı kaynak işlemleri için ısı güç yoğunlukları [56].

işlem	Güç yoğunluğu(W/m ²)
Toz altı Ark kaynağı	5x10 ⁶ -10 ⁸
Gaz altı Ark kaynağı	5x10 ⁶ -10 ⁸
Plazma kaynağı	5x10 ⁶ -10 ¹⁰
Lazer veya Elektron kaynağı	5x10 ¹⁰ -10 ¹²

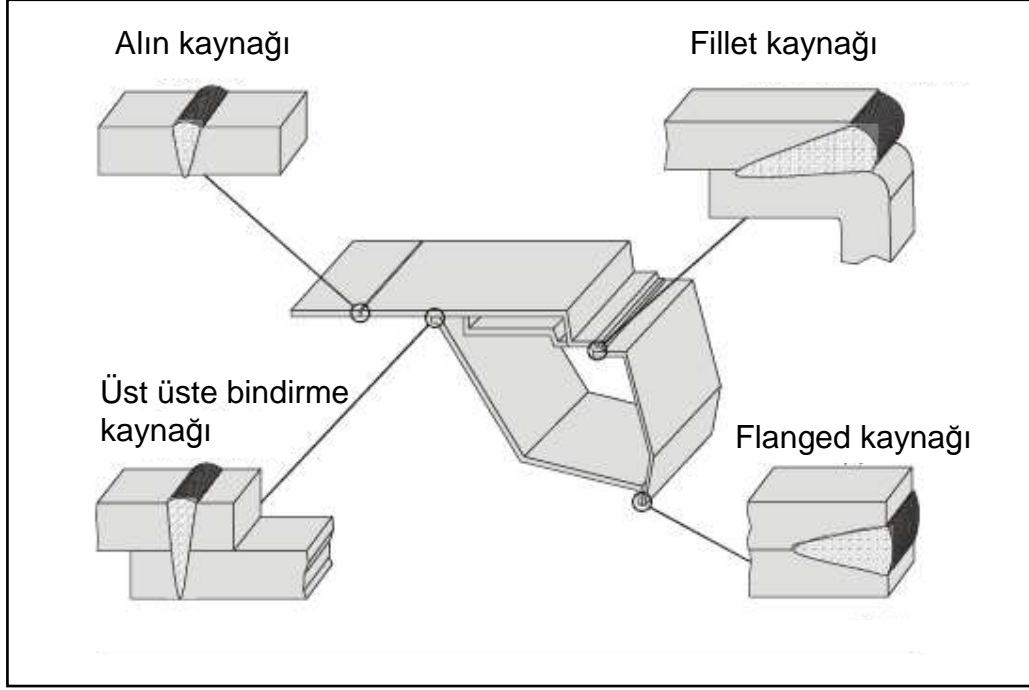
Yapılan bir çok çalışmada, lazer kaynağı ile elde edilen kaynağa eşdeğer kalitede bir kaynağa ancak vakum altındaki elektron kaynağı ile ulaşılabileceği görülmüştür [21]. Kullanılan diğer kaynak işlemleri ile karşılaştırıldığında, lazer kaynağının sahip olduğu avantajlar Tablo 3.2’de sıralanmıştır.

Tablo 3.2: Lazer kaynak işleminin diğer kaynak işlemlerine göre avantajları.

Lazer Kaynağının Avantajları
Yüksek kaynak hızı
Minimum kaynak genişliği
Isıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) dar olması
Isı nedeni ile oluşabilecek yamulmaların minimum olması
Yüksek derinlik/genişlik oranı
Farklı maddelerin birleşimi
Minimum kirlilik
Oda sıcaklığında kullanım

Lazerin en önemli özelliklerinden biride otomasyona tabi tutulabilmesi ve seri üretim yapan hatlara kolayca uygulanabilir olabilmesidir. Özellikle Nd:YAG lazerleri fiberler ile istenilen noktaya kolayca taşınabilir ve robot kolları yardımı ile her noktadaki kaynağı uzaktan yapabilme olanağı sağlamaktadır. Şekil 3.2’de otomobil gövdesinde bulunan ve lazer ile kaynak edilen birleştirmeler görülmektedir [28]. Bu

özelliklerinden dolayı yüksek güçlü lazerler otomotiv, tüketici ürünleri, uzay ve elektronik endüstrisinde çok çeşitli malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmaktadır [57].



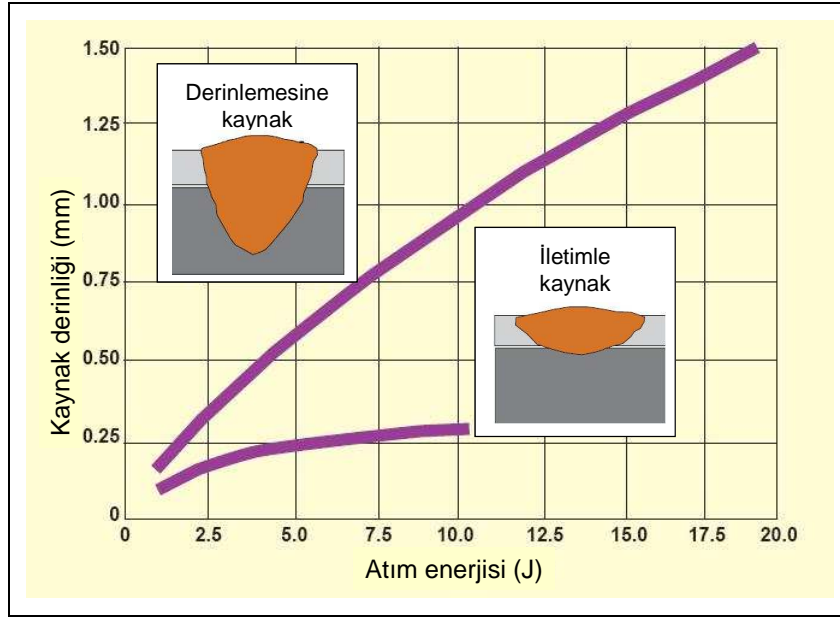
Şekil 3.2: Otomobil gövdesinde bulunan ve lazer ile kaynak yapılan eklemler [28].

Kaynak işlemleri için kullanılan üç tip lazer vardır: CO₂ lazeri, Nd:YAG ve Diyet lazerler. Nd:YAG lazerler elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde 1064 nm dalgaboyunda ışına verirler. Bu dalgaboyu iletken metaller tarafından çok iyi soğurulur. Çoğu metaller için yansıtıcılığı %20-30 arasındadır. Yakın kızıl ötesi bölgesindeki ışınlar standart optik aletler yardımı ile 25 µm spot elde edilebilecek şekilde odaklanabilir. Diğer yandan uzak kızıl ötesi bölgesinde ışına veren CO₂ lazerin başlangıç yansıtıcılığı % 80-90 arasındadır ve 75-100 µm spot elde edebilmek için özel optik aletlere ihtiyaç vardır. Bunun yanı sıra Nd:YAG lazeri ile elde edilen güç maksimum 4000 W iken CO₂ lazerleri ile 10000W çıkış gücü elde etmek mümkündür. Bu büyük farklar nedeni ile bu iki tip lazer malzeme işlemenin değişik uygulama alanlarında kullanılmaktadır [58]. Yüksek güçlü diod lazerlerin dalgaboyu GaAs kristali içine katkı yapılan maddenin konsantrasyonuna bağlıdır. (Al;780-800 nm, indium; 880-1100 nm, fosfor; 630-690 nm) genelde katkı maddesi olarak alüminyum kullanılır ve yaklaşık dalgaboyu 808 nm dir.

Diod lazerlerin gücü sisteme yerleştirilen diod çubuklara dayanmaktadır. Diod çubukların sayısındaki artış ile 6 kW lazer çıkışı elde etmek mümkündür. Ancak bu sayıdaki artış demet şeklinin daireden sapmasına neden olur ve demetin yönlendirilebilirliği azalır. CO₂ ve Nd:YAG lazerleri ile karşılaştırıldığında diod lazerlerin parlaklığı düşüktür [58].

3.2 Lazer ile Kaynak Yöntemleri

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 3.3'te derinlemesine ve iletimle kaynağın paslanmaz çelik örnekleri üzerinde kaynak derinliğine olan etkisi gösterilmektedir. Bu iki kaynak çeşidi arasındaki temel fark, iletimle kaynak sırasında kaynak havuzunun kapalı, derinlemesine kaynak işleminde açık olması ve lazer demetinin daha derine etki etmesidir.



Şekil 3.3: Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak, iletimle ve derinlemesine kaynak işleminin paslanmaz çelik üzerindeki karşılaştırılması[59].

3.2.1 İletimle kaynak

İletim ile kaynak işleminde kaynak derinliği çok fazla olmadığından ince metallerin birleştirilmesinde kullanılan bir tekniktir [59]. Bir lazer demeti odaklama sistemleri (küresel aynalar, mercekler) 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. Metaller ve çoğu malzemeler ışık geçirmez olduğu için malzeme içine ışık geçişi olmaz. 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 [21]. Maksimum kaynak derinliğine, malzeme yüzey sıcaklığının, kaynama noktasının hemen altında olduğu sıcaklıklarda erişilir. Atımlı lazerler kullanılarak yapılan işlemlerde kaynak derinliği Eşitlik 3.1 ve Eşitlik 3.2' ye bağlı olarak lazer tepe gücünün yanı sıra malzeme yüzeyindeki lazer demetinin çapı ile kontrol edilir. Lazer çapının kontrol edilmesi lazer enerjisinin geniş bir alana yayılması açısından önemli bir parametredir.

$$I = \frac{P}{D} \quad (\text{W/cm}^2) \quad (3.1)$$

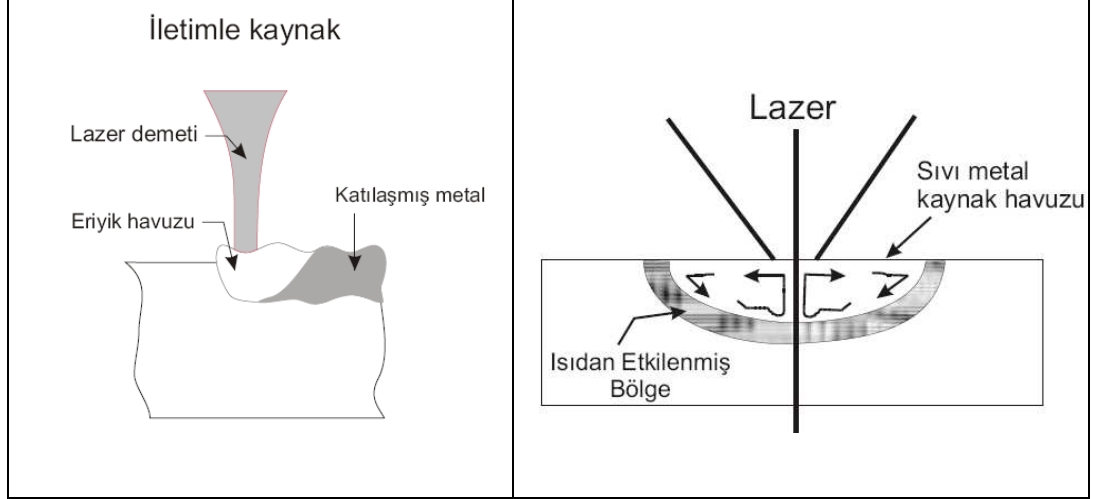
$$P = \frac{E}{t_a} \quad (\text{J/s}) \quad (3.2)$$

Burada, I; lazer şiddeti, P; tepe gücü, D lazer demet çapı, E; atım enerjisi, t_a ; atım süresidir.

Soğurulan enerji yerel olarak ısınmaya neden olur. Yeterli enerjiye ulaşıldığında malzeme erir ve lazer demeti hareket ettirildiğinde eriyik soğumaya başlar ve katılaştır, böylece birleşme sağlanmış olur [60].

İletimle kaynak işlemleri sırasında erimiş metal ile dış atmosfer arasındaki etkileşim nedeniyle erimiş metal yüzeyinde oksitlenme meydana gelir. 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 Helyumdur. Bunlara ek olarak karışık gazlar ve karbondioksit gazının kullanılabilceği rapor edilmiştir [61].



Şekil 3.4: İletimle Kaynak [21].

İletim ile kaynak koşulları altında, yüzey erime işleminin başlaması için sıcaklık değeri büyük önem taşımaktadır (Şekil 3.4). Lazer odağının merkezindeki ($r = 0$) sıcaklık;

$$T(0,t) - T_0 = \frac{\alpha I(0)w}{k(2\pi)^{1/2}} \tan^{-1} \left(\frac{8\kappa t}{w^2} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

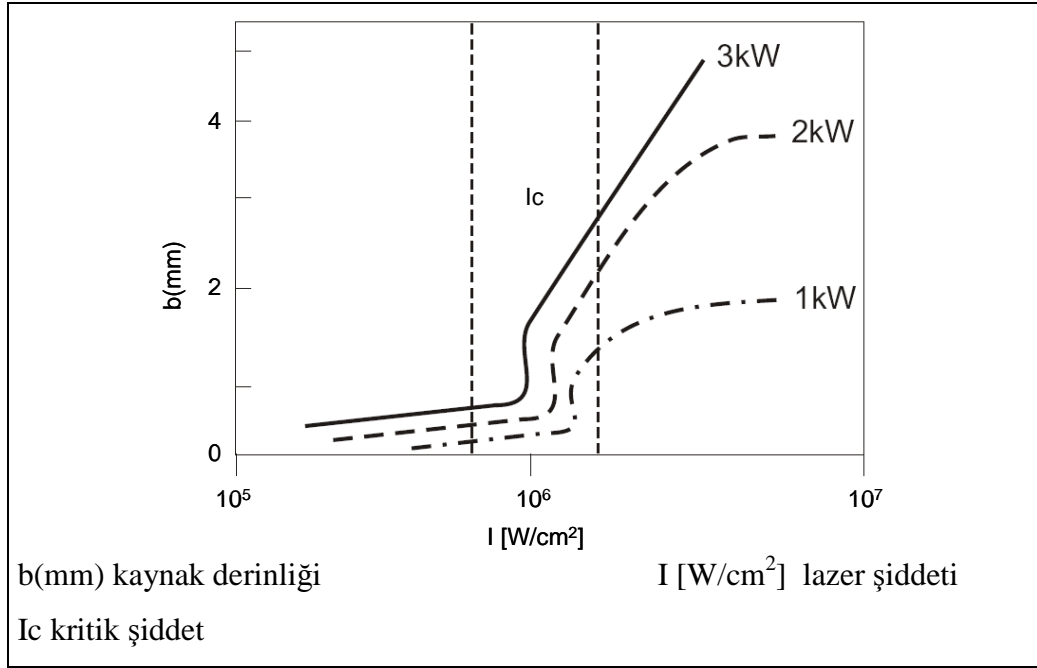
ile verilir [62]. Burada, α ; soğurma katsayısı, k ; ısısal iletkenlik katsayısı, κ ; ısısal yayılım katsayısı, w ; gauss şeklinde demetin yarıçapı, T_0 ; çevredeki ısı ve t ; zamandır.

Eşitlik (3.3) bağlı olarak $I_e(0)$ lazer şiddetinin odak merkezinde $T(0,t) = T_e$ erime sıcaklığına ulaşabilmesi için, lazer demetinin t süresi boyunca malzeme ile etkileşmesi gerekir. Spot kaynak koşullarında t_e süresini $T(z=0) = T_e$ ulaştığı zaman olarak kabul edersek, z_h kaynak havuzunun derinliği;

$$z_h \approx \frac{0.16 \cdot \alpha \cdot I}{\rho L_f} (t - t_e) \quad (3.4)$$

ile ifade edilebilir [30]. Burada ρ ; eriyik yoğunluğu, L_f ; gizli füzyon sıcaklığıdır.

İletim ile kaynak işleminden derinlemesine kaynak işlemine geçiş lazer şiddetinde ve atım süresindeki artma ile meydana gelir [21]. İletim ile kaynak işleminden derinlemesine kaynak işlemine geçişler Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Çoğu metal için kritik güç yoğunluğu 10^6 W/cm^2 dir [60]. Bu değerden sonra buharlaşma artmaya başlar ve anahtar deliği (keyhole) oluşur.



Şekil 3.5: İletimle kaynaktan derinlemesine kaynağa geçiş için kritik güç yoğunluğu [60].

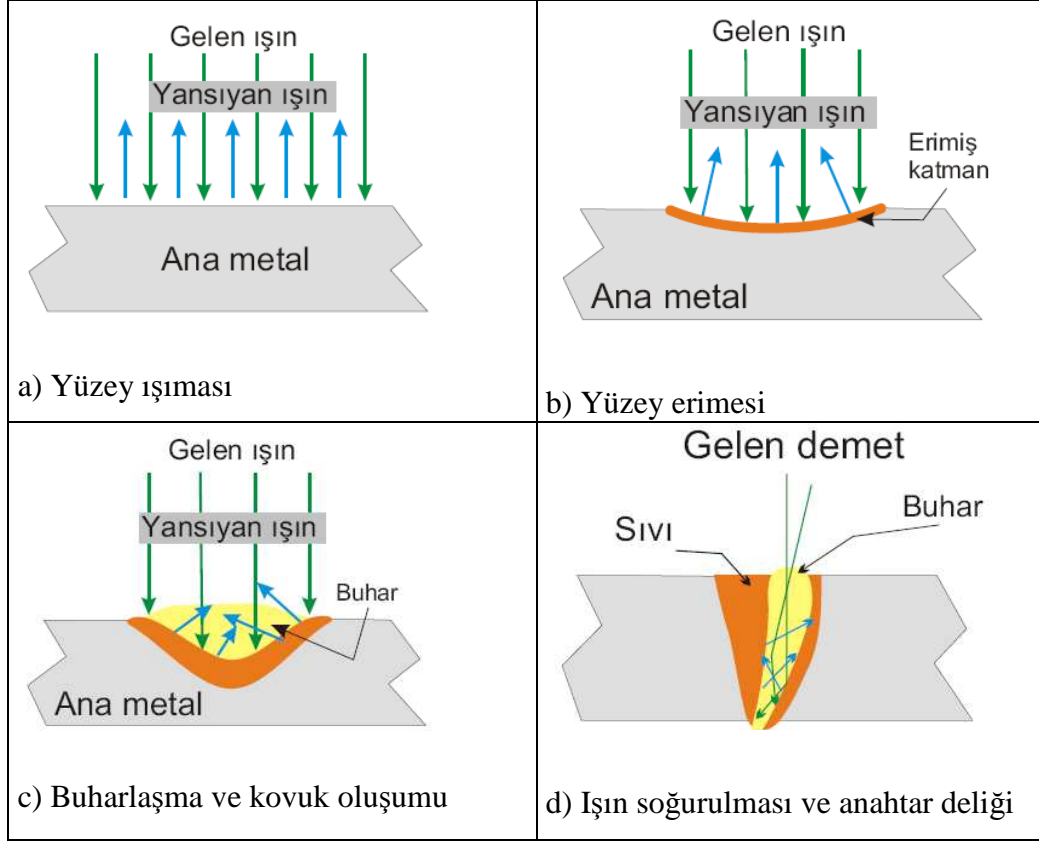
3.2.2 Derinlemesine Nüfuz Eden Kaynak (Anahtar Deliği Kaynağı)

Yeterince güç yoğunluğuna sahip (10^6 W/cm^2) bir lazer demeti malzeme yüzeyine odaklandığında lazer demeti malzeme yüzeyini hızlı bir şekilde eriterek buharlaştırmaya başlar [63-65]. 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 lazerin malzeme

yüzeyindeki odak yarıçapına eşittir. Eriyik halde bulunan malzemede yüzey gerilimi, buhar basıncı ve yer çekimi arasındaki kararlı denge sonucu anahtar deliği açık tutulmaktadır [66]. 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, ve 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.

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 Fresnel soğurması ve çoklu yansımaların etkisi ile lazer enerjisinin malzemeye aktarılmasında çok önemli rol oynar ve karacisim 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 katılaşır [67].

Kaynak çukuru oluşturarak malzemelerin kaynatılması işlemi, özellikle kalın sacların kaynak edilmesi için uygun bir yöntemdir [67]. Derinlemesine nüfuz eden kaynak işleminde meydana gelen aşamalar Şekilde 3.6'te gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı [68].

Düzlemsel bir yüzey ve gauss formunda şiddet dağılımına sahip bir lazer ışını için buharlaşma sıcaklığı;

$$T_b - T_0 = \frac{\alpha I(0)w}{k(2\pi)^{1/2}} \tan^{-1} \left(\frac{8\kappa t}{w^2} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

ile verilir [30]. Eşitlik (3.5) bağlı olarak $I(0)$ lazer şiddetinin odak merkezinde T_b buharlaşma sıcaklığına ulaşılabilmesi için, lazer demetinin t süresi boyunca malzeme ile etkileşmesi gerekir.

3.3 Lazer İle 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 Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3: Madde ile ışığın etkileşimi sırasında önem taşıyan fiziksel olaylar.

Hedefin özelliği	Fiziksel nedeni
Işığı soğurma özelliği	Işıktan gelen enerjinin ne derece hedef tarafından soğurulduğunun göstergesidir. Materyal yüzeyi, soğurma katsayısı ve lazer dalgaboyundaki yansımaya 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	Materyalde meydana gelebilecek erime, buharlaşma gibi faz değişiklikleri için gerekli enerji miktarını belirleyen özelliktir. Yoğunluk, ısı kapasitesi, erime ve buharlaşma sıcaklıkları önemli fiziksel parametrelerdir.

Yüksek güçlü lazer ile malzeme işleme sırasında meydana gelen fiziksel olaylar bu bölümde alt başlıklar halinde incelenecektir.

3.3.1 Soğurma

Bir lazer ışını bir hedef yüzeyine çarptığında gelen ışının bir kısmı soğurulur ve bir kısmı yansır. Lazer demetinin metal tarafından soğurulması dalgaboyu, metalin iletkenlik gibi elektriksel özelliklerine, lazer demetinin metal yüzeyine gelme açısına, polarizasyona ve odaklanma şiddetine bağlıdır [32]. Malzemelerde soğurma mekanizması kullanılan lazerin dalgaboyuna göre farklılaşmaktadır. CO₂ lazerinin soğurulması metalin elektriksel iletkenliği ile belirlenir [32]. Metallerin iletkenliği ise serbest iletim elektronunun yoğunluğuna bağlıdır. Serbest iletim elektronları CO₂ lazerinin düşük frekansından dolayı CO₂ 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 CO₂ lazer ışının küçük bir kısmını soğururlar. Nd:YAG lazeri dalgaboyuna gelindiğinde yüksek frekanstan dolayı elektron yansıtma

mekanizması bu dalgaboyuna uygulanamaz [32]. Bu dalgaboyunda 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 [32].

Gelen ışının soğurulması üstel soğurulma yasasına göre belirlenir [16];

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.6)$$

Burada $I(x)$; x derinliğindeki ışın şiddeti, I_0 gelen ışının şiddeti, α soğurma katsayısıdır ve

$$\alpha = \frac{4n}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3.7)$$

ile bulunabilir [62]. Burada n ve k sırasıyla kırılma indisinin gerçel ve sanal kısımlarıdır. Bazı metallerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları Tablo 3.4'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4: Bazı metallerin oda sıcaklığındaki soğurma katsayıları [62].

Metal	Nd:YAG	CO ₂
Al	0.06	0.02
Cu	0.05	0.015
Fe	0.1	0.03
Ni	0.15	0.05
Ti	0.26	0.08
Zn	0.16	0.03
Karbon çelik	0.09	0.03
Paslanmaz çelik	0.31	0.09

Soğurma katsayısı maddesel bir özellik olup çok küçük miktardaki optik enerjinin madde içinde birim derinliğe depolanmasını ifade eder. Δx gibi küçük artmalarda depolanan enerji;

$$|\Delta E(x)| = E_0 \alpha e^{-\alpha x} \Delta x \quad (3.8)$$

ile ifade edilir. Burada E_0 ; yüzeye gelen enerjidir. Böylece yüzey üzerindeki enerji depolama maksimumdur ve derinlikle birlikte monoton bir şekilde azalmaktadır [16]. Metaller için soğurulma katsayısı 10^5 cm^{-1} mertebelerindedir ve enerji yaklaşık 10^{-5} cm kalınlıkta depo edilir [16].

Derinlik, δ ;

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (3.9)$$

ile ifade edilir [62]. Burada λ ; dalgaboyu, k ; kırılma indisinin sanal kısmıdır. Bu yüzden Nd:YAG ve CO₂ lazerleri ile vurulan metallerde ısı kaynağı yüzeyde yerleşmiş olarak düşünülebilir.

3.3.2 İletim

Elektromanyetik ışınımın elektron alan vektörü ve manyetik alan vektörü ile tasvir edilebilir. Işınım elastik bağlı yüklü bir parçacık üzerinden geçtiğinde parçacık elektrik alanının yarattığı güç ile harekete zorlanır. Işımanın frekansı parçacığın doğal rezonans frekansına karşılık gelmediği durumda floresan 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 fononları 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.

Malzemenin lazer enerjisini soğurması, malzemenin ısı yayılım katsayısına bağlıdır. Isı yayılım katsayısı, ısısal enerjinin ne derecede hızlı kabul edildiği ve iletildiği konusunda belirleyicidir ve ;

$$\kappa = \frac{k}{\rho c} \quad (3.10)$$

ile ifade edilen ısı yayılım katsayısı, k; ısısal iletkenlik ve c; özgül ısıya bağlı bir katsayıdır. Kaynak işlemlerinde, yüksek ısısal iletkenlik ısısal şok ve kırılmalardan önce nüfuz etme oranının büyük olmasını sağlar. t_a atım süresince ısının etki ettiği dikey mesafe;

$$D_t = (4\kappa t_a)^{1/2} \quad (3.11)$$

ile belirlenir [16]. Burada κ ; ısısal yayılmadır. Malzeme içinde ısının iletilmesi konusunda önem taşıyan diğer bir parametre ısısal zaman sabitidir. ısının belirlenen bir derinliğe (x) ilerlemesi için gereken zamanı ifade eden ısısal zaman sabiti;

$$t_k = \frac{x^2}{4\kappa} \quad (3.12)$$

İle ifade edilir. Bazı metallere ait ısısal yayılım katsayısı ve ısısal zaman sabitleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5: Bazı metallere ait ısısal yayılım katsayısı ve ısısal zaman sabitleri [16].

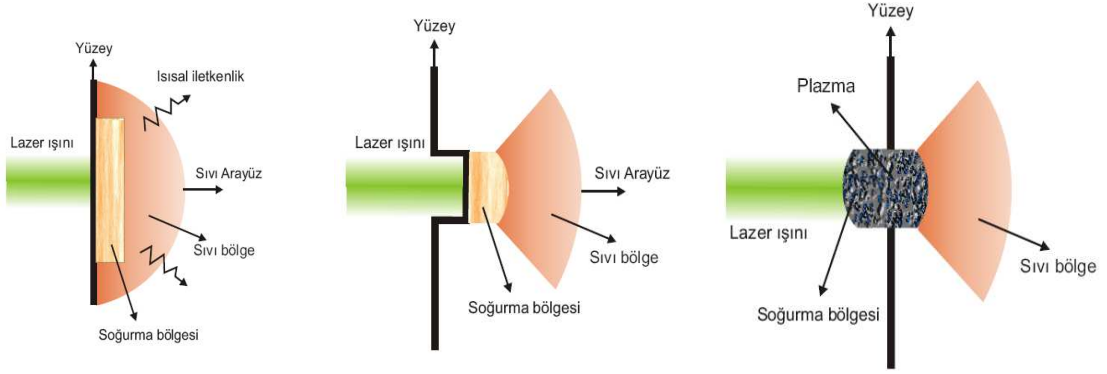
Metal	Isısal Yayılma Katsayısı (cm ² /s)	Isısal Zaman Sabiti (ms)			
		Kalınlık (cm)			
		0.01	0.02	0.05	0.1
Gümüş	1.70	0.015	0.059	0.368	1.47
Alüminyum Alaşımları	0.850	0.029	0.118	0.74	2.94
Bakır Alaşımları	1.14	0.022	0.088	0.55	2.19
Demir Alaşımları	0.202	0.124	0.495	3.09	12.38
Nikel Alaşımları	0.220	0.114	0.454	2.84	11.36

Etkin bir lazer kaynağı elde edebilmek için lazer atım süresi ile metalin ısısal zaman katsayısı yaklaşık olarak eşit olmalıdır [16]. İnce metaller için (0.01-0.02 cm), ısısal zaman sabiti normal lazerlerin atım süresinden (ms) kısadır, ancak Q- anahtarlama ile karakterize edilen lazerlerin atım süresinden çok uzundur, bu nedenle etkin bir eritme işlemi Q- anahtarlama lazerler ile pratik olmamaktadır [16]. Kalın (~0.1cm), ısısal dağılımı düşük olan metaller için, makul bir atım süresinde ısının metal içine aktarılması sırasında ısısal zaman katsayısı çok uzun duruma gelir. Ancak yüksek ısısal iletkenliğe sahip metallerde (gümüş, bakır veya saf alüminyum), ısısal zaman katsayısı birkaç milisaniye mertebelerinde olabilir. Bu tür metallerde ısı, normal lazer atımları ile derinlemesine daha fazla ilerleyebilir [16].

Isısal dağılımın düşük olması, ısının derinlemesine iyi ilerlememesi anlamına gelir. Ama ısısal dağılımın yüksek değerleri ısının yüzeyden hızlı bir şekilde yok olması gibi bazı problemleri ortaya çıkartır. Bu durum eritme miktarını azaltabilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için farklı metaller için farklı lazer parametreleri kullanmak gereklidir [16].

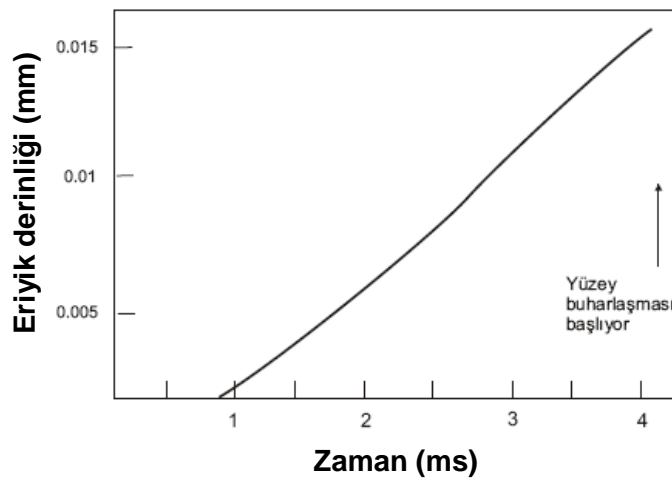
3.3.3 Erime ve buharlaşma

Yüzeyde depolanan lazer enerjisi hedefe ısısal 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 ışıma yeteri kadar güçlü olursa, buharlaşan metal içindeki soğurma ışık geçirmez bir plazmanın (veya iyonlaşmış gaz) 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 3.7 de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Yüksek şiddetli bir lazer ışınının metal yüzeye çarptığında gerçekleşen fiziksel süreç: Erime, buharlaşma ve plazma oluşumu.

Yüksek güçlü bir lazerin soğurulmasından dolayı gerçekleşen ısınma etkisi çok hızlı gerçekleşebilir ve yüzey hızlı bir biçimde erime sıcaklığına ulaşır [16]. Maksimum erime derinliğine yüzeyde buharlaşma oluşmadan erişebilmek istenilen bir durumdur, ancak bu durum lazer parametreleri açısından sadece dar bir menzilde gerçekleşir. Eğer lazer ışınması 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. Şekil 3.8' de şiddeti 10^5 W/cm^2 olan bir ışının soğurulması ile nikel bir örnekte erimiş metalin zamana bağlı olarak derinlik değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 3.8: Şiddeti 10^5 W/cm^2 olan bir lazer aydınlatması ile gerçekleşen soğurma için Nikel hedefin hesaplanan nüfuz etme derinliği [16].

Şekil 3.6’da görüldüğü gibi atımın başlamasından yaklaşık 4 ms sonra yüzey buharlaşmaya başlar. Bu da gösterir ki malzemelerde yüzey buharlaşması başlamadan önce nüfuz etme derinliğinin belli bir limiti vardır. Normal şartlarda buharlaşma sıcaklığına çok kısa sürelerde ulaşılır, buharlaşma sıcaklığına ulaşma zamanı t_B ;

$$t_B = (\pi/4)(k\rho c / F^2)(T_b - T_0)^2 \quad (3.13)$$

ile verilir [16]. Burada k ısısal iletkenlik, ρ yoğunluk, c malzemenin ısı kapasitesi, T_b malzemenin buharlaşma sıcaklığı, T_0 ortam sıcaklığı ve F soğurulan ışıma. Tablo 3.6’da Şiddeti 10^5 - 10^7 W/cm² aralığında olan ışının soğurulması durumunda bazı metaller için buharlaşma sıcaklığına ulaşma süreleri (t_B) verilmiştir.

Tablo 3.6: Buharlaşma sıcaklığına ulaşmak için gereken zaman [16].

Metal	Soğurulan lazer ışıması (W/cm ²)		
	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Kurşun	118 ms	1.18ms	12 ns
Çinko	128 ms	1.28 ms	13 ns
Magnezyum	245 ms	2.45 ms	24.5 ns
Titanyum	319 ms	3.19 ms	31.9 ns
Krom	1.54 ms	15.4 ms	154 ns
Nikel	1.84 ms	18.4 ms	184 ns
Demir	1.86 ms	18.6 ms	186 ns
Alüminyum	3.67 ms	36.7 ms	367 ns
Molibdenyum	5.56 ms	55.6 ms	556 ns
Bakır	8.26 ms	82.6 ms	826 ns
Tungsten	10.46 ms	104.6 ms	1046 ns

Yüksek şiddetli lazer ışımalarında ($>10^6$ W/cm²), buharlaşmanın başlaması için gereken süre çok kısa olduğundan fazla miktarda malzemeyi eritecek kadar zaman yoktur. Bu nedenle ilgilenilen fiziksel işlem buharlaşmadır. Yüzey buharlaşma sıcaklığına ulaştıktan sonra lazer enerji vermeye devam eder. Daha sonra malzeme hedeften buhar olarak kopar ki bu malzemedeki bir deliğin oluşmasına yol açar.

Yüksek dereceli lazer ışımalarında ısısal iletimden kaynaklanan kayıplar oldukça küçüktür. Bu koşullar altında oluşan deliğin derinliği;

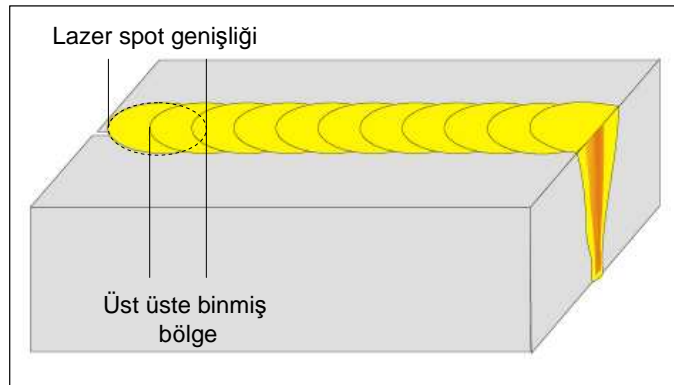
$$D_{delik} = Ft_a / L_f \rho A_s \quad (3.14)$$

ile elde edilebilir [16]. Burada t_a ; atım süresi, A_s ; odak alanı, ρ ; yoğunluk, F ; soğurulan ışımaya, L_f ; buharlaşmanın gizli özgül sıcaklığıdır. Lazer ile oluşturulan delikten dışarı atılan malzemenin bir kısmı buharlaşarak bir kısmı da deliğin dışı doğru oluşturduğu buhar basıncı ile erimiş metal damlaları halinde atılır [40].

3.4 Atımlı Nd:YAG Lazer Parametrelerinin Dikiş Kaynağına Etkisi

Endüstriyel lazer kaynak uygulamalarında kullanılan Nd:YAG lazerler günümüzde 0.3 - 3kW ortalama güç çıkışı sağlayabilmektedirler, ileri uygulamalarda ise bu güç çıkışı 4kW a kadar arttırılabilmektedir [69]. Nd:YAG lazerler sürekli çıkış modu, atımlı çıkış modu ve Q-anahtarlı mod olmak üzere üç farklı şekilde çıkış sağlar [62]. Atımlı Nd:YAG lazerleri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı yeni bir teknolojidir. Özellikle otomotiv, elektrik ve elektronik endüstrisinde çok ilgi gören bir birleştirme yöntemidir [70].

Atımlı lazerler ile dikiş kaynağı işlemi; periyodik bir şekilde tekrarlanan lazer atımlarının, materyal yüzeylerinin kısmen üst üste getirildiği kaynak bölgesinde bir eriyik veya dikiş oluşturması ile gerçekleşir. Dikiş kaynağının oluşumu Şekil 3.9'de gösterilmiştir [71].



Şekil 3.9: Atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak yapılan dikiş kaynağı.

Dikiş kaynağının oluşumu ve kalitesi; kullanılan atımlı lazerin atım enerjisi, süresi, şekli, frekansı, odak genişliği ve kaynak hızı olmak üzere bir çok farklı parametreye bağlıdır. Bu parametrelere ek olarak modern Nd:YAG lazerleri kHz tekrarlama oranlarında da atım şeklini kontrol etme olanağı sağlamaktadır. 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 lazer parametrelerin doğru kombinasyonu sağlandığında mümkün olmaktadır. Atımlı lazer kaynak kalitesini etkileyen tüm parametreler Şekil 3.10’de bir parametre diyagramı halinde görülmektedir [71].



Şekil 3.10: Atımlı lazer kaynağı kalitesini etkileyen parametreleri gösteren parametre diyagramı [71].

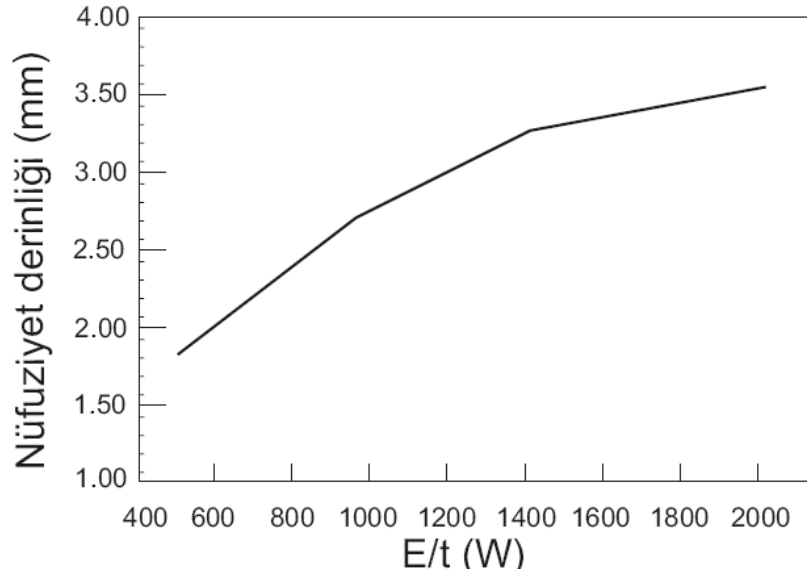
Düşük gücüne rağmen sürekli modta çalışan CO₂ ve Nd:YAG lazerleri ile karşılaştırıldığında atımlı modtaki Nd:YAG lazerleri, özellikle küçük endüstriyel ürünlerin kesme, delme, kaynak işlemlerinde tercih edilirler [70].

Dikiş kaynağına etki eden atımlı Nd:YAG lazer parametrelerini; kullanılan lazer atımının tepe gücü, süresi, frekansı, şekli, odak konumu ve koruyucu gaz alt başlıkları halinde inceleyeceğiz.

3.4.1 Atımın tepe gücü

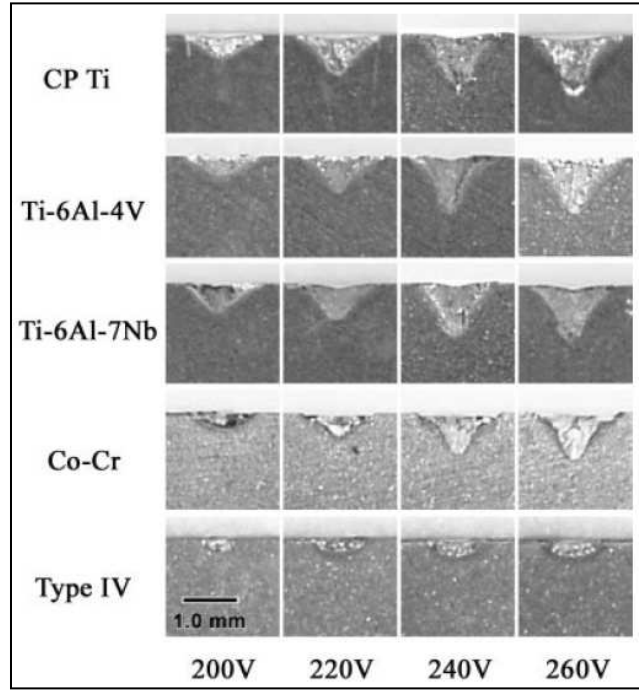
Atımlı bir lazerin tepe gücü; bir atımın enerjisinin atım uzunluğuna oranı ile elde edilir. Çalışılacak materyal üzerinde yüksek güç yoğunluğu elde edebilmek, anahtar deliği kaynağına erişebilmek ve kaynak oluşumunu kontrol edebilmek için atımın tepe gücü önemli bir parametredir. Eğer kaynak havuzu çok büyük veya çok küçük olursa veya aşırı derecede buharlaşma meydana gelirse iyi sonuçlar elde edilmez [64]. Atımlı lazerin tepe gücü Eşitlik 3.2 deki gibidir

Şekil 3.11'deki grafikte, 4ms atım süreli Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 Alüminyum alaşımların kaynak işlemi sırasında tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi görülmektedir [72]. Şekil 3.11' de görüldüğü gibi atım süresi sabit tutulduğunda atım enerjisi ve tepe gücü artarken kaynak derinliği de artmıştır.



Şekil 3.11: 4 ms atım süreli Nd:YAG lazeri kullanılarak 2124 Alüminyum alaşımların kaynağında tepe gücünün kaynak derinliğine etkisi [72].

Değişik alaşımlarla yapılan çalışmalarda da aynı etki görülmüştür. Farklı alaşımlar için tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi Şekil 3.12'de görülmektedir [73].

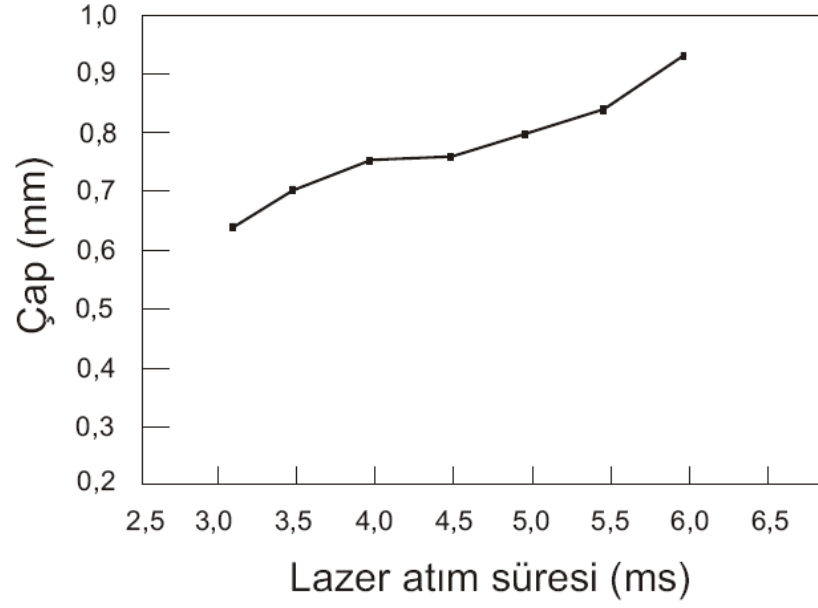


Şekil 3.12: Farklı alaşımlar için atımlı Nd:YAG lazerin tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi [73].

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 [72].

3.4.2 Atım süresi

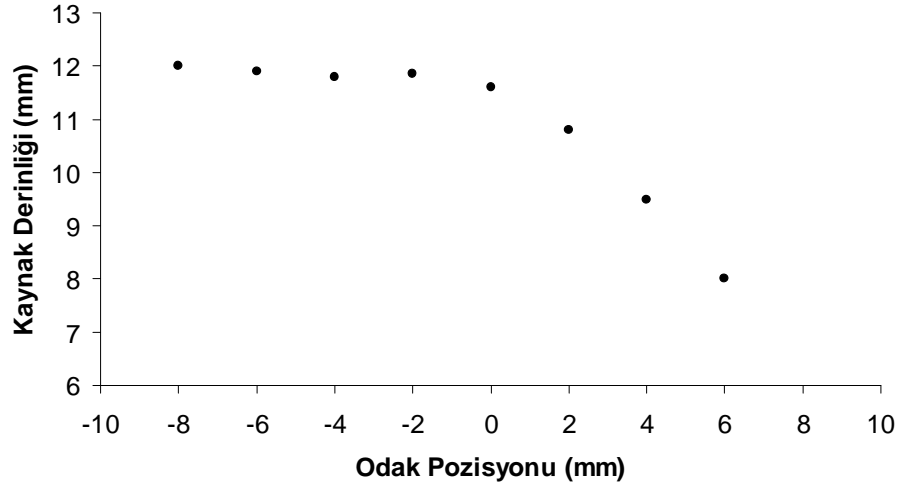
Tepe gücü sabit tutularak atım süresi arttırıldığında; atım başına düşen enerji miktarının arttığı Eşitlik 3.2'den görülmektedir. Bu durumda lazer demeti ile metal arasındaki etkileşme zamanı artar ve buna bağlı olarak daha geniş erime bölgesi meydana gelir [30]. 0.1 mm kalınlığındaki bakır levhaların 1.25kW tepe gücünde atımlı Nd:YAG lazeri ile kaynak işlemi sırasında, atım uzunluktaki artışın kaynak genişliğine etkisinin sonuçları Şekil 3.13'da görülmektedir.



Şekil 3.13: 1.25 kW tepe gücü kullanılarak, 0.1 mm kalınlığındaki bakır levhaların kaynak işlemi sırasında ,lazer atım uzunluğunun kaynak genişliğine etkisi [30].

3.4.3 Atımın odak konumu

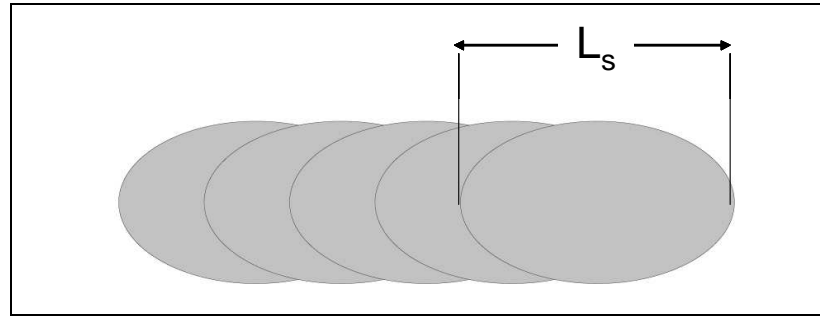
Atımın odak noktasının konumu kaynak işlemi ve kalitesi için önemli bir parametredir. Lazer demeti tam olarak parçanın yüzeyine veya parçanın yüzeyinin altına odaklanabilir [74]. Lazer demeti parça yüzeyinin üzerinde bir noktaya odaklandıktan sonra, açılmaya başlayan demet malzeme yüzeyine düştüğünde enerjinin büyük kısmı yansımalarından dolayı kaybolmakta ve yeteri kadar kaynak derinliği sağlanamamaktadır. Odak düzlemi malzemenin yüzeyinde (0) ve yüzeyin altında oluşturulduğunda kaynak derinliğinde bir artış gözlenmektedir [74]. İyi derecede kaynak boyutu ve kalitesi elde edebilmek için lazer odağının malzeme yüzeyinin, malzeme kalınlığının 1/3 mesafe altına odaklanması gerekir [74]. Şekil 3.14'de atımlı Nd:YAG lazeri kullanarak (40 Hz frekansta 4.5 kW ortalama güç, 0.4 m/dk kaynak hızı) 14 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemelerin kaynak işlemi sırasında odak konumunun kaynak derinliğine etkisi görülmektedir [75].



Şekil 3.14: Odak konumunun lazer kaynağındaki etkisi [75].

3.4.4 Atım frekansı ve hız

Atımlı lazerler ile kaynak işlemi; kısmen üst üste binen periyodik spotlar ile gerçekleşir [64]. Bu spotların üst üste binme oranının kaynak kalitesi üzerindeki etkisi çok fazladır (bkz. Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Atımlı lazer ile kaynak işlemi sırasında üst üste binen periyodik spotlar [71].

Atımlı lazer ile kaynak işlemi sırasında atımların üst üste binme oranı;

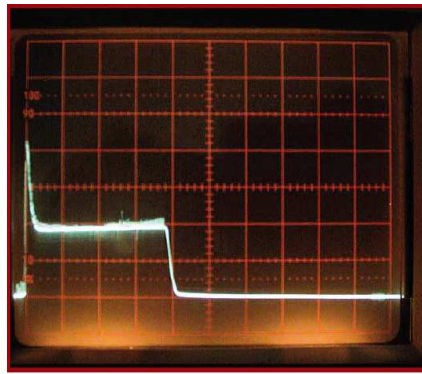
$$P_{ER} = \left[1 - \frac{V \cdot f}{L_s + V \cdot t_a} \right] \quad (3.15)$$

ile ifade edilir. Burada V ; kaynak hızı, L_s ; hareket sırasında malzeme yüzeyine çarpan spotun uzunluğu, t_a ; atım süresi ve f ; lazer frekansıdır. Magnezyum ile

yapılan bir çalışmada, en iyi çekme dayanımının (tensile stress), üst üste gelme oranının %75 olduğu durumda sağlandığı gözlenmiştir [76]. Lazer atım süresi sabit tutulduğu bir kaynak işleminde, üst üste binme oranının istenilen değerde tutulabilmesi için kaynak hızı ile frekans birbirlerine bağlı hale getirilir. Kaynak işleminin yüksek hızlarda gerçekleşmesi isteniyorsa, buna bağlı olarak frekansta aynı oranda yüksek olmalıdır. Bu nedenle lazer frekansı ile kaynak hızı arasında hassas bir denge vardır.

3.4.5 Atım şekli

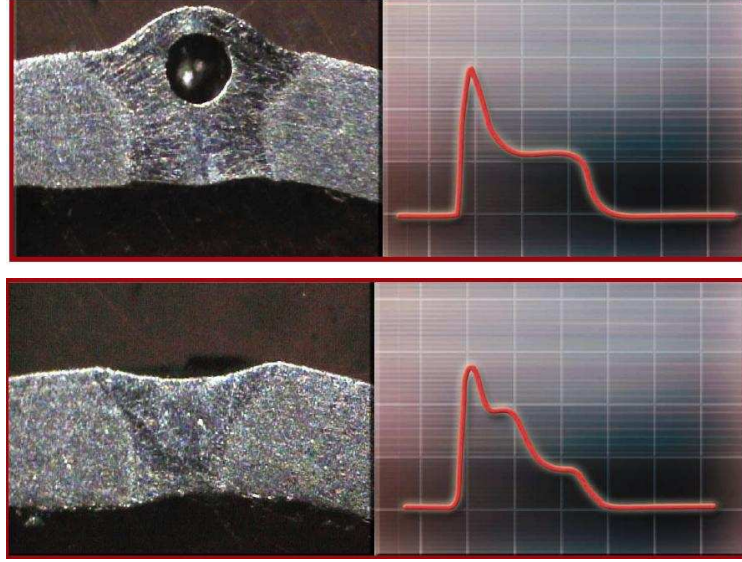
Atımlı Nd:YAG lazerler yüksek tepe gücüne sahip olduklarından dolayı; bakır, alüminyum alaşımlar gibi yüksek yansıtıcılığa ve ısıl iletkenliğe sahip metallerin kaynağında iyi sonuçlar vermektedirler [77]. Ancak yüksek karbon içeren çelik, döküm alaşımlar ve alüminyum alaşımların büyük kısmında standart atım şekli ile kaynak yapılması durumunda çatlama, gözenekler ve diğer kaynak kusurları meydana gelebilir. Oluşabilecek bu kusurları ortadan kaldırmak için atım şekillendirilmesi tekniği kullanılmaktadır [77]. Atım şekillendirme işlemi sayesinde lazer atımının enerji dağılımını zamana bağlı olarak kontrol etmek mümkün olur. Şekil 3.16’de GSI Lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli görülmektedir [77].



Şekil 3.16: GSI lumonics firmasının ürettiği atımlı Nd:YAG lazerlerin atım şekli [77].

Lazer atım şeklinin değiştirilmesi, ana atıma ek olarak değişik enerji ve sürelerde atımlar eklemek ile gerçekleştirilir [77]. Bu sayede malzemenin daha yavaş soğuması, yüzey yansıtıcılık etkilerinin giderilmesi veya yüzeyinin temizlenmesi

sağlanabilir. Yüksek karbon içeren çelik, kırılmaya hassas alaşımlarda yapılan kaynak işlemlerinde veya erime noktaları farklı iki metalin kaynatılması işlemi, soğutucu atım şeklinin çatlakları ve gözenekleri ortadan kaldırdığı gözlenmiştir [77]. Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma Şekil 3.17’de görülmektedir.

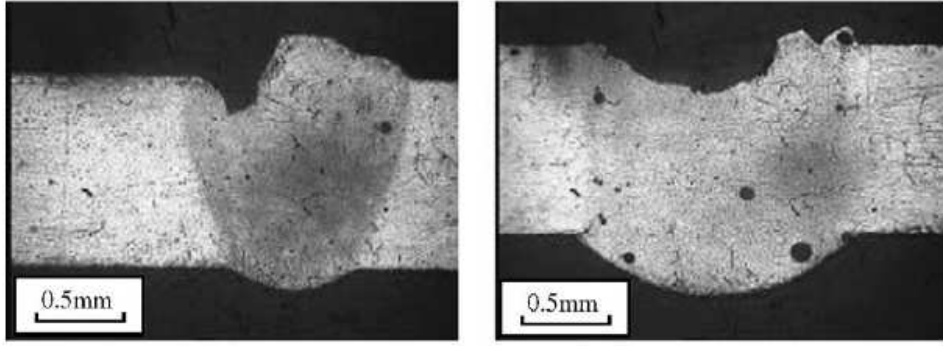


Şekil 3.17: Soğutucu atım şekli kullanılarak yapılmış örnek bir çalışma [77].

3.4.6 Koruyucu gaz

Lazer kaynak işlemlerinde kullanılan koruyucu gaz, kaynak işlemini kararlı hale getirmek ve erimiş metalin atmosferde bulunan gazlarla etkileşmesini önleyerek oksitlenmesini engellemek için kullanılır [78]. Kullanılan gazın kimyasal içeriğinin yanı sıra gazın akış geometrisinin de kaynak kalitesi üzerinde çok fazla etkisi vardır [78].

Eğer gaz akışı yavaş ise erimiş metali oksitlenmeden koruma da yetersiz kalır, gaz akış hızı yüksek olursa kaynak geometrisi bozulur veya kusurlar ortaya çıkar [79]. Bunun yanı sıra koruyucu gazın akış yönü iyi ayarlanmazsa Şekil 3.18’te görüldüğü gibi kaynağın üst kısmında bozulmalar meydana gelebilir [79].



Şekil 3.18: Lazerle kaynak sırasında kullanılan koruyucu gazın akış yönünden kaynaklanan kusurlar [79].

BÖLÜM 4 LAZER İLE MALZEME İŞLEME DENEY DÜZENEĞİ: LAZER SİSTEMİ, ÖLÇÜM SİSTEMİ VE MATERYAL

Bu tez çalışmasında, atımlı JK 760 TR Nd:YAG lazeri kullanılarak $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}^3$ boyutlarında Ti6AL4V titanyum alaşımların kaynak işlemleri yapılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan lazer, optik sistem ve tasarlanan deneysel düzeneği ayrıntılı olarak incelenecek ve kullanılan lazerin ve titanyum alaşımların kaynak işlemine hazırlanış aşamaları, kaynağı yapılan titanyum alaşımların özellikleri, kullanım alanları ile kaynak sırasında neden lazer kaynağına ihtiyaç duyulduğu ayrıntılı bir biçimde anlatılacaktır.

4.1 Nd:YAG Lazeri Ve Deneysel Düzenek

Deneysel çalışmalarda GSI Lumonics şirketi tarafından üretilen atımlı JK760TR Nd:YAG lazeri kullanılmıştır. Yüksek demet kalitesine sahip bu lazer tüm metaller için kesme, delme, kaynak işlemlerini yapabilecek kabiliyettedir. Yüksek frekanslarda dahi atım şeklinde değişiklik yapma olanağı vererek zamana bağlı ısı aktarımını da kontrol edilebilir kılan Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde (LATARUM) var olan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri.

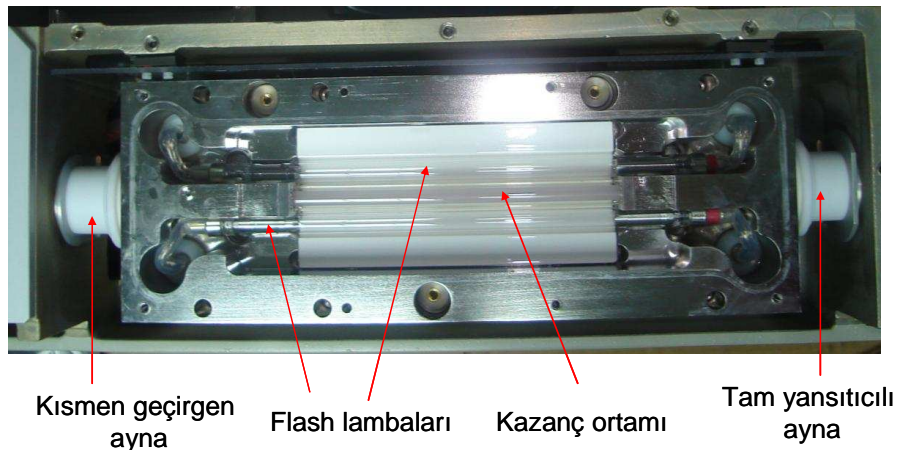
Maksimum ortalama güç	600 W
Maksimum tepe gücü	10 kW
Atım uzunluğu değişim aralığı	0.3 ms- 50 ms
Frekans değişim aralığı	5 Hz- 500 Hz
Demet kalitesi (mm.mrad)	28
Dalgaboyu	1064 nm

Lazer sistemi Şekil 4.1’de gösterildiği gibi üç üniteden oluşmaktadır: kovuk içinde yer alan flaş lambaları için gerekli elektrik akımını sağlayan güç ünitesi, lazer ışının oluştuğu lazer kovuğu ve odaklama ünitesi.



Şekil 4.1: Deneysel çalışmalarda kullanılan Nd:YAG lazer sistemi: güç ünitesi, lazer kovuğu ve odaklama ünitesi (LATARUM).

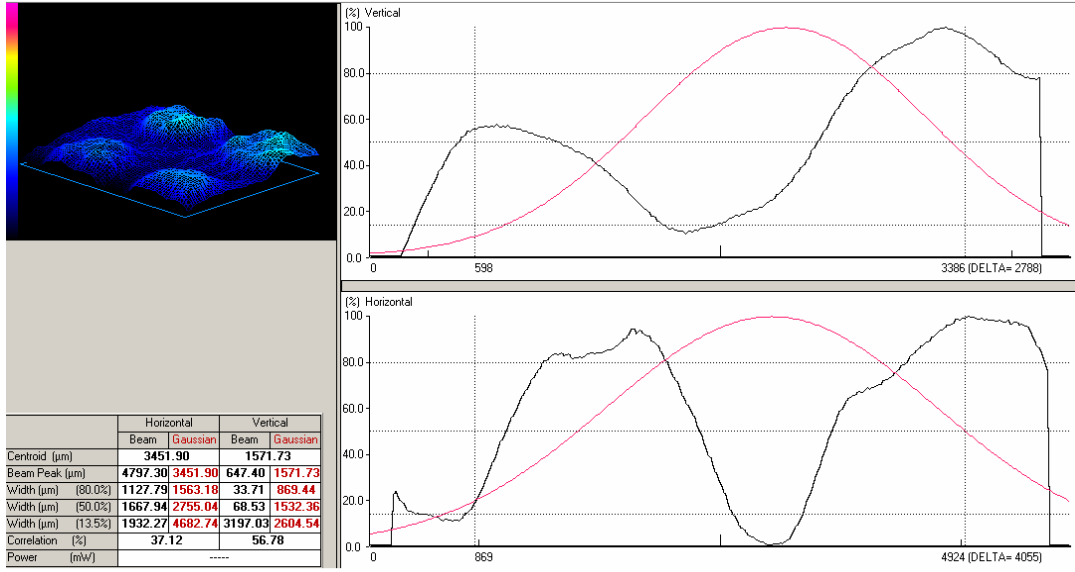
Lazer kavuğu iç yüzeyleri yüksek yansıtıcılığa sahip birer merkezleri çakışan alüminyumdan yapılmış elipslerden oluşmaktadır. Her bir elipsin merkezlerinin birinde flaş lambaları, diğer merkezinde kazanç kristali olacak şekilde ayarlanmıştır. Biri tam yansıtıcı diğeri kısmen geçirgen iki ayna arasında yer alan kazanç ortamından çıkan lazer ışınları, lazerin kontrolünü sağlayan ve bilgisayar destekli elektro-optik aletlerden geçirilerek fiber kabloya gönderilir. 600 µm core çapına ve 10m uzunluğa sahip fiber kablo aracılığıyla lazer ışınları, odaklanma ünitesinin yer aldığı lazer ışığının dışarı sızmasını önleyen kara kutu içerisine gönderilir. Kullanılan Nd:YAG lazerine ait kovuk Şekil 4.2 de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: JK760TR Atımlı Nd:YAG lazerinin kovuğu (LATARUM).

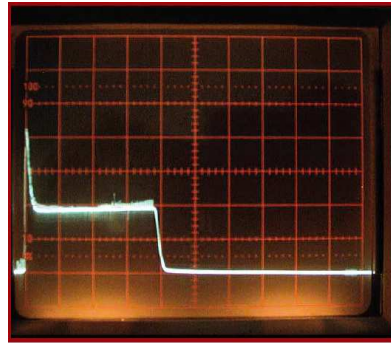
Lazer kovuğunda bulunan flaş lambaların soğutma işlemi şehir hattından alınan su ile sağlanırken, kristali soğutmak için iyonize su kullanılır.

Lazer odaklama ünitesine aktarılan lazer demetinin enine modları, demet şekil belirleyici (LPB serisi Newport) kullanılarak TEM₁₁ olarak belirlenmiştir. Lazer demetinin TEM modu Şekil 4.3 te gösterilmektedir.



Şekil 4.3: Lazer demetinin TEM₁₁ modunun demet şekil belirleyici (Newport) ile elde edilmiş görüntüsü [80].

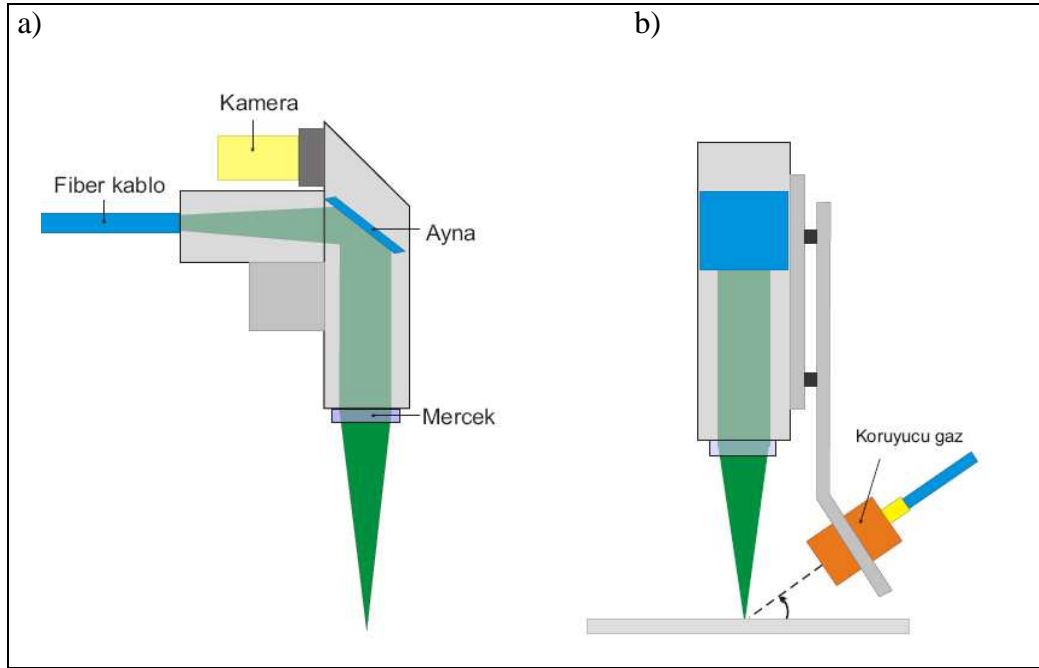
Lazer atımlarının enerji dağılım zaman eğrisi, hızlı diyot (D-100 Newport) kullanılarak ölçülmüştür. Tüm uygulamalar için en temel atım şekli olan kare atım şeklinin görüntüsü Şekil 4.4'teki gibidir. Atımın başında yer alan pik, eriyik havuzu oluşana kadar metallerin yansıtıcılığının üstesinden gelebilmek için oluşturulmuştur.



Şekil 4.4: Kullanılan lazerin kare atım şekli [77].

Lazer odaklama ünitesinde bulunan (odak uzaklığı, 160 mm) bir mercek ile 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.

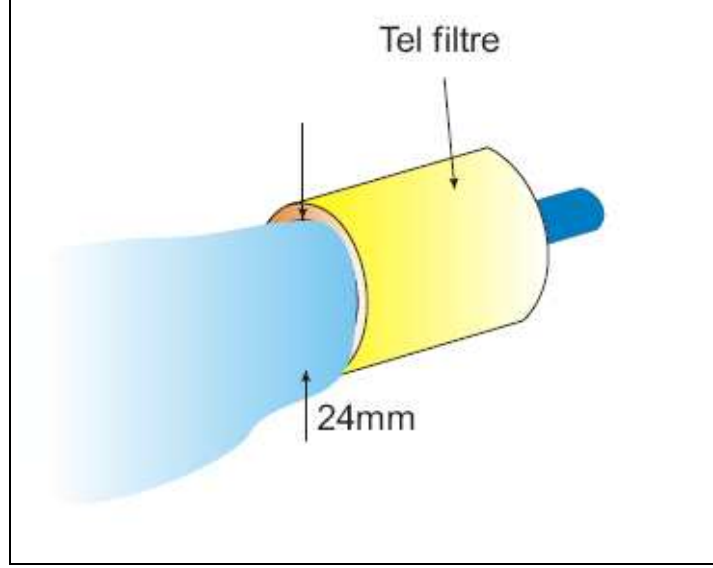
Odaklama ünitesinin hareketi, 3 eksende mikrometre hassaslıkta hareket sağlayabilen bilgisayar kontrollü bir CNC sistem sayesinde sağlanmıştır. Kaynak sırasında, erimiş metalin çevredeki hava ile reaksiyona girmesiyle oksitlenmesini önlemek ve kaynak havuzunun kararlılığını sağlayabilmek için sisteme bir koruyucu gaz ilave edilmiştir. Gaz çıkışı sağlayan ünitenin çapı 24 mm olup yatay eksen ile 39 derece açı yapacak şekilde ayarlanmış ve lazer demeti ile eş zamanlı olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Koruyucu gaz olarak helyum kullanılmıştır. Odaklama ünitesine ve koruyucu gaz ünitesine ait bir şema Şekil 4.5’de görülmektedir.



Şekil 4.5: Lazer odaklama ve koruyucu gaz ünitesi.

Gazın kullanımı sırasında dikkat edilecek nokta, gaz basıncının metal yüzeyi üzerinde türbülansa neden olmayacak şekilde ayarlanmasıdır. Oluşabilecek türbülansı engellemek için 24 mm lik çıkış ünitesinin içine tel filtre eklenmiştir. Bu

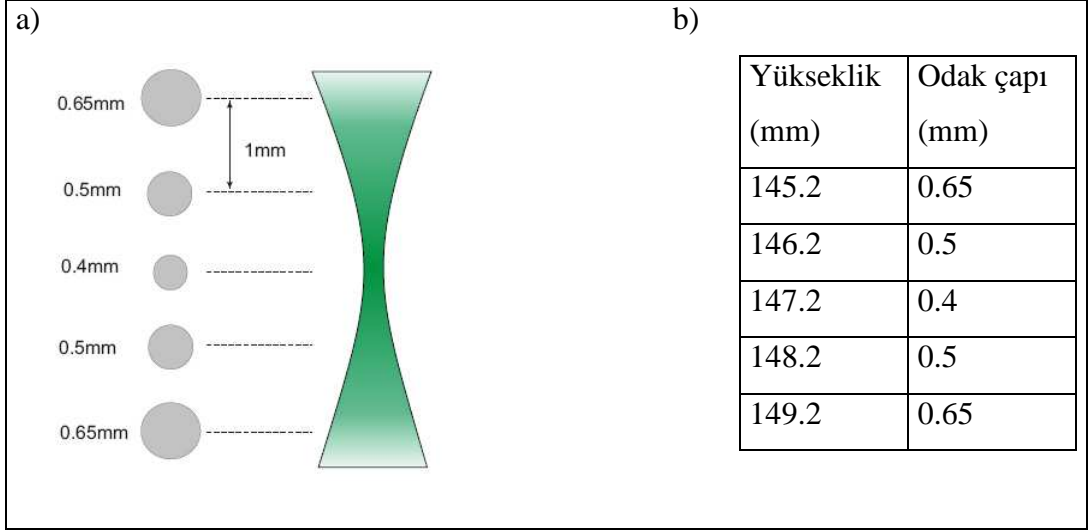
sayede aktarılan gazın daha yavaş ve geniş hacimde kaynak bölgesine ulaşması ve türbülansa neden olmaması sağlanmıştır. Kullanılan çıkış ünitesi ve tel filtre Şekil'4.6 da görülmektedir.



Şekil 4.6: Koruyucu gaz ünitesi. Gaz basıncını kontrol etmek amacıyla çıkış ünitesine tel filtre ilave edilmiştir.

4.2 Lazer Demetinin Odağının Belirlenmesi

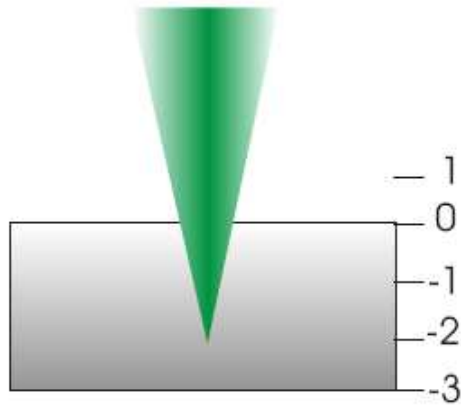
Lazer demetinin odak noktasının, dolayısıyla minimum olması istenen spot çapının belirlenmesi, kaynak işlemi açısından büyük önem taşımaktadır. Gelen ışının tamamen hedefi yakalayabilmesi ve ısı yayılımından kaynaklanabilecek hataları minimuma indirebilmek için, lazerin odağının belirlenmesi işleminde, hedef olarak özel film plakalar kullanılmıştır. Belli bir yükseklikten başlayıp 1mm'lik adımlar ile CNC sistem kullanılarak z ekseninde tarama işlemi yapılmıştır. Yükseklik ölçümü, metal yüzeyi ile merceğin önünde bulunan koruyucu cam arasında yapılmıştır, spot çapının yüksekliğe göre değişimi Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7: a) Odak çapının yüksekliğe göre değişimi. b) mercek koruyucusundan metal yüzeyine olan mesafesinin değişimine göre spot çapının değişimi

Koruyucu camdan 147.2 mm uzaklıkta, minimum spot çapı 0.4 mm olarak elde edilmiştir. Odak mesafesinin odaklama ünitesine uzaklığı belirlendikten sonra kamera ile lazer odağı çakıştırılmıştır. Bu işlem, birbirini takip eden kaynak işleme çalışmalarında odağın, kameranın görüntüsüne bağlı olarak hızlı bir şekilde bulunmasını sağlar. Ayrıca her kaynak sırasında, koruyucu cam ile metal yüzeyi arasındaki mesafe kumpas yardımı ile ölçülerek işlemin doğruluğu teyit edilmiştir.

Kaynak işlemleri sırasında lazer demeti, 3mm kalınlığındaki titanyum alaşımların üst yüzeyinin 2 mm altına odaklanmıştır. Bu durumda malzeme yüzeyinde elde edilen spot çapı 0.65 mm'dir. Şekil 4.8'de metal ve odak pozisyonuna ait detaylar gösterilmektedir.



Şekil 4.8: Lazer demeti malzemenin yüzeyinin 2 mm altına odaklanmıştır.

4.3 Ti6AL4V Titanyum Alaşımları

Mühendislikte kullanılan metaller arasında doğadaki yaygınlığı bakımından alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alan Titanyum metali ilk olarak 1791 yılında William Gregor tarafından bulunmuştur [81]. Kömür küllerinde ve volkanik kayalarda yoğun olarak bulunan parlak gri renkte yoğunluğu az (hafif) ve aşınma oranı oldukça düşük bir metaldir. Organik asit, klor gazı ve solüsyonlarına, seyreltilmiş sülfürik ve hidrolik aside dayanıklı olan titanyum, yüksek derecede nitrojende yanan tek metal olma özelliğini taşımaktadır [81]. Son yıllarda, titanyum metali uçak, otomotiv, enerji, sağlık ve nükleer güç santrallerinde giderek artan miktarlarda tüketilmektedir [82].

Uzay roketlerinin en önemli parçalarını titanyum alaşımlar oluşturmaktadır. Sürtünme yüzünden yüksek sıcaklıklara ulaşan roket uçlarında, yakıtın yandığı motor bölümünde ve gazların egzoz çıkışlarında aşırı ısınma sorunu titanyum alaşımların yüksek erime sıcaklıkları (1677 °C) sayesinde ortadan kaldırılmıştır [81]. Titanyum alaşımların kullanımı geçmiş yıllarda yüksek maliyetleri açısından sadece yarış otomobillerinde ve özel üretim otomobillerde sınırlı kalırken, günümüzde üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde otomotiv endüstrisinde kullanımı giderek artmıştır. Titanyum alaşımların otomotiv endüstrisinde kullanım amaçlarından en önemlisi; otomobil ağırlığını minimuma indirerek, CO₂ yayılımı ile ortaya çıkan küresel ısınma sorununu olabildiğince azaltmaktır [82]. Titanyum alaşımlar dayanım/yoğunluk oranı bakımından bilinen en yüksek değere sahip metallerdir. Yoğunluğu 4.5 g/cm³ iken dayanımları üretim kalitesine bağılı olarak 480 MPa' dan 1100 MPa 'a kadar değişmektedir [83]. Titanyum alaşımlar yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda implant olarak kullanılan en önemli metallerdir [84]. İnsan vücudunda bulunan asidik sıvının Ph değeri 7.4 tür. Titanyum alaşımlar bu asit değeriinden etkilenmedikleri için insan vücuduna adaptasyon bakımından en uygun metallerdir.

En çok kullanılan titanyum alaşım tipi genellikle Ti6AL4V sembolleri ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır. Endüstriyel uygulamalarda % 45'lik kullanımı ile en büyük payı Ti6AL4V alaşımlar almaktadır [84]. Ti6AL4V

alaşımların en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir. Bu özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar başta olmak üzere, hava araçlarında ve basınç tankları yapımında çok fazla tercih edilmektedir [85]. Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

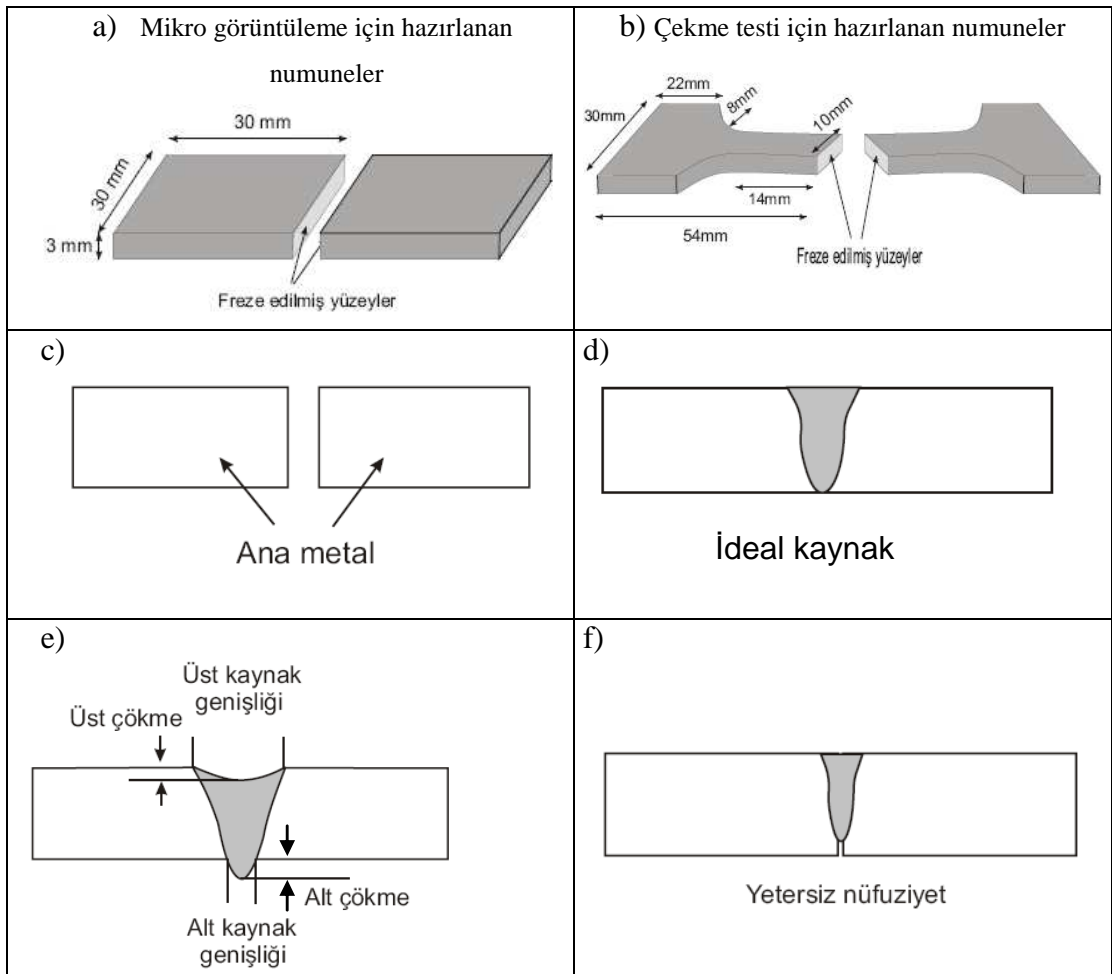
Tablo 4.2 Ti6Al4V alaşımların fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği [86].

Fiziksel Özellik	Değer	Kimyasal içerik	Ti6Al4V
Yoğunluk g/cm ³	4.42	Alüminyum, Al	6,0%
Erime sıcaklığı °C±15°C	1649	Vanadyum, V	4,0%
Özgül ısı J/kg.°C	560	Demir, Fe	0,1%
Hacimsel elektrik direnci ohm.cm	170	Oksijen, O	0,15%
Isısal iletkenlik W/m.K	7.2	Nitrojen, N	0,01%
Isısal yayılma katsayısı 0-100°C/°C	8.6x10 ⁻⁶	Hidrojen, H	<0,003%
Isısal yayılma katsayısı 0-300°C/°C	9.2x10 ⁻⁶	Karbon, C	0,03%
Beta Transus °C±15°C (°F)	999	Titanyum, Ti	Denge miktarı

Titanyum alaşımların yüksek erime sıcaklığı ve bu yüksek sıcaklıklarda atmosferde bulunan gazlar ile çok fazla reaksiyona girerek oksitlenmesi nedeniyle geleneksel kaynak yöntemleri (özellikle tıbbi uygulamalarda) titanyum alaşımlar için kullanılamaz. Titanyum alaşımların döküm ve lehim işlemleri ancak vakum veya argon ortamında yapılır. Bu nedenlerden dolayı titanyum alaşımlar için en uygun birleştirme yöntemi; lazer ile kaynak işlemidir [87]. Lazer ile kaynak işlemlerinde ana metal ek bir malzeme olmadan kaynak edilebilir veya aynı malzeme ek malzeme olarak kullanılabilir. Böylece titanyum alaşımının paslanmazlık özelliği ve mekanik sertliği düşürülmemiş olur. Bunlara ek olarak, tüm metaller için kaynak derinliğinin fazla olmasını sağlayan; metalin lazer soğurma katsayısının yüksek ve ısısal iletkenliğinin düşük olması gerekir [88]. Dışılıkte kullanılan metaller (Co, Cr, Ni, Mo ve Ti) ile karşılaştırıldığında titanyum, lazer soğurma katsayısı en yüksek metaldir [87]. Değerli metaller (Au, Ag, Pt ve Pd) ile karşılaştırıldığında ise ısısal iletkenliği en düşük metaldir (0,17 W. cm⁻¹.deg⁻¹) [87]. Bu nedenle lazer ile birleştirme titanyum alaşımlar için en uygun yöntemdir [87].

4.4 Ti6Al4V Titanyum Alaşımların Kaynak ve Test İşlemlerine Hazırlanması

Kaynağı yapılacak numunelerin işleme hazırlanması kaynak kalitesi ve test cihazlarına tabii tutulması açısından büyük önem taşımaktadır. Kaynak işlemlerinden sonra ikisi aynı örnekler üzerinde olmak üzere toplam üç farklı test yapıldığı için numuneler kaynak işlemine iki farklı şekilde hazırlanmışlardır. Mikro yapılarının, kaynak derinliğinin, optik mikroskop ile görüntüleme ve sertlik testleri için numuneler 30 x 30 x 3mm³ boyutlarında dikdörtgenler prizması şeklinde şerit testere ile kesilmiştir. Numunelerin bir yüzleri oluşabilecek gözenekleri minimum hale getirmek için freze yardımı ile olabildiğince pürüzsüz hale getirilmiştir. Çekme testleri için hazırlanan numuneler, ISO 178 standartlarına uygun şekilde hazırlanmış ve birbirlerine bakan yüzeyleri freze ile pürüzsüz hale getirilmiştir. Kaynak işlemine hazırlanan numunelerin biçim ve boyutları Şekil 4.9 (a) ve (b)'de görülmektedir.



Şekil 4.9 a) Mikro görüntüleme ve b) Çekme testi için hazırlanan numuneler.

Kaynak edilen metallerin kesit alanları kaynak kalitesi hakkında önemli bilgiler vermektedir. İdeal bir kaynağın geometrisini Şekil 4.9 (d)'de görülmektedir. Uygun parametreler kullanılmadığında elde edilebilecek hatalı kaynak geometrileri de Şekil'4.9 (e) ve (f)'de görülmektedir.

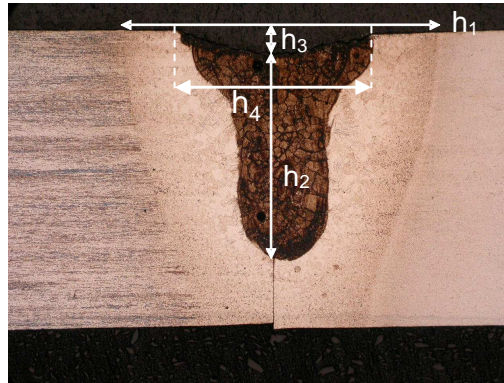
Kaynak işlemi süresince metaller, aşırı ısınma nedeniyle her zaman sıcaklıktan kaynaklanan bir gerilmeye maruz kalırlar. Yüksek gerilme ise eriyik havuzunun soğuması sırasında çatlamalara neden olur. Çatlamaları ortadan kaldırmak için kaynak yapılacak numuneler, demetin odak bölgesinde bir şasi üzerine menteşeler ile sıkıştırılmıştır (bkz. Şekil 4.1).

Kaynak işlemlerinden sonra örneklerin teste tabii tutulabilmesi içinde bir takım çalışmaların yapılması gerekmektedir. Optik mikroskop görüntülerinin alınabilmesi için örnekler ilk olarak şerit testere yardımı ile kaynak yönüne dik olarak kesilmiştir, ve ek olarak 30x30x3mm³ lük örneklerin fazla olan bölümleri de şerit testere yardımı ile alınmıştır. Daha sonra numunelerin parlatma işlemlerinin cihaz tarafından yapılabilmesi için numuneler bakalite alınmıştır. Parlatma işlemi kaba (P500A) zımparadan başlanarak ince (P3000A) zımparada bitirilmiştir.

BÖLÜM 5 Ti6AL4V TİTANYUM ALAŞIMLARIN KAYNAK PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Atımlı lazerler ile yapılan kaynak işlemlerinde kaynak kalitesini belirleyen çok fazla parametre vardır. Bunlar atım enerjisi, atım süresi, frekans, kaynak hızı, atım şekli, odak pozisyonu, kullanılan koruyucu gaz tipi ve şiddeti. Kaliteli bir kaynak tüm bu parametrelerin en iyi birleşimi ile elde edilir. Parametrelerin kaynak üzerindeki etkilerini belirleyebilmek için parametrelerden biri değişken olarak kullanılırken diğer tüm parametreler sabit tutulmalıdır. Aksi takdirde meydana gelen etkinin hangi parametreden kaynaklandığı anlaşılamaz ve doğru kaynağı elde etmek daha zor bir hal alabilir.

Deneysel çalışmanın yapıldığı bu bölümde en iyi kaynak parametreleri elde edilmeye çalışılmış ve parametrelerin kaynak kalitesi üzerindeki etkileri yapılan testler yardımı ile belirlenmeye çalışılmıştır, elde edilen bilgiler ve grafikler ayrıntılı bir biçimde verilecek ve değerlendirmesi yapılacaktır. Mikro görüntüleme, Vickers sertlik testi ve olmak üzere 2 farklı test tüm parametreler için uygulanmıştır. Testler Tübitak MAM mekanik özellikler laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında kaynak bölgesindeki bölgeler Şekil 5.1 de gösterildiği gibi simgelenmiştir. h_1 metal yüzeyindeki ısıdan etkilenmiş bölgeyi, h_2 kaynak havuzunun derinliğini, h_3 yüzeyde meydana gelen kraterlerin derinliğini, h_4 kaynak havuzunun yüzeydeki genişliğini simgelemektedir. Örneklere ait bu parametreler optik mikroskop ile elde edilmiştir.



Şekil 5.1: Testler sırasında kullanılan mesafe simgeleri.

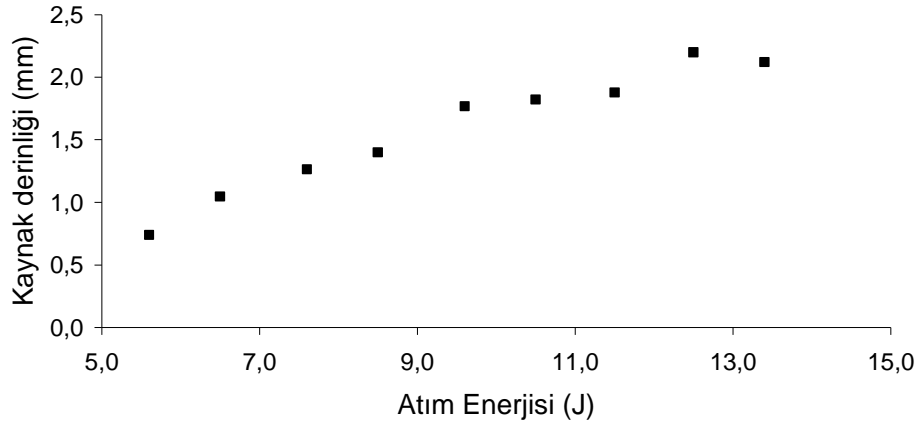
5.1 Atım Tepe Gücünün Belirlenmesi Ve Kaynak İşlemindeki Etkisi

Kaynak çalışmalarına lazer tepe gücünün belirlenmeye çalışması ile başlanmıştır. Lazer Tepe Gücü, atım enerjisinin atım süresine oranına eşittir. Lazer tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi 30x30x3mm³ lük Ti6AL4V alaşımlar üzerinde belirlenmeye çalışılmıştır. Lazer tepe gücünün kaynak derinliği üzerindeki etkisi incelenirken lazer atım enerjisi değişken olarak alınıp atım enerjisi 5.6 J'dan 13.4 J'a kadar 1 J'lük adımlar ile artırılmış ve diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. İşlem sırasında kullanılan parametreler tablo 5.1 gibidir.

Tablo 5.1: Kaynak derinliği belirlerken kullanılan parametreler.

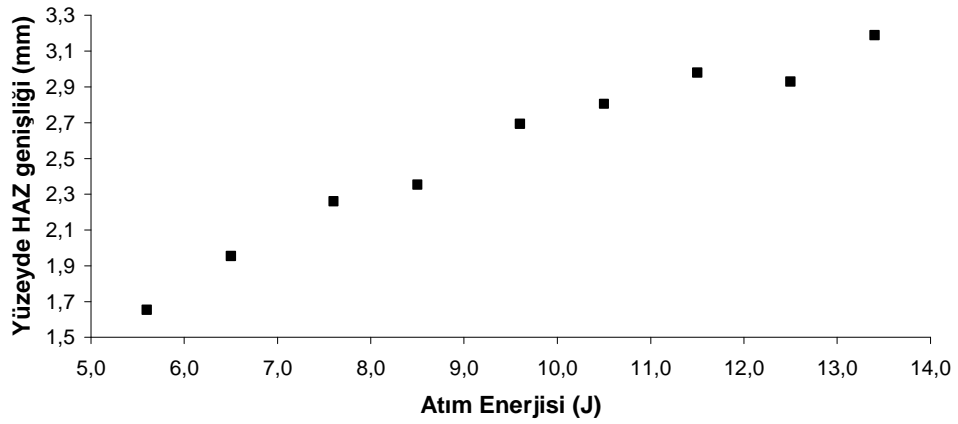
Atım Enerjisi (J)	5.6, 6.5, 7.6, 8.5, 9.6, 10.5, 11.5, 12.5, 13.4
Odak pozisyonu (mm)	-2 mm sabit tutulmuştur
Atım uzunluğu (ms)	5, 7, 10
Frekans Hz	43 sabit tutulmuştur
Kaynak Hızı (mm/s)	5 sabit tutulmuştur
Gaz basıncı (bar)	1.5 sabit tutulmuştur

Lazer enerjisindeki artış ile metal içindeki kaynak derinliği de artmıştır. Atım enerjisinin düşük olduğu durumlarda kaynak derinliği ile enerji arasında doğrusal diyebileceğimiz bir değişim gözlenmektedir. Ancak daha yüksek şiddetlerde işlem yapıldığında değişim doğrusallıktan uzaklaşmaktadır. Bunu sebebinin anahtar deliği üzerinde oluşan plazmadan kaynaklandığını söyleyebiliriz. Kaynak derinliği oluşan plazmanın gelen lazer enerjisini soğurması ile kontrol edilmektedir. Kaynak derinliğinin enerjiye göre değişimi Şekil 5.2 de görülmektedir.



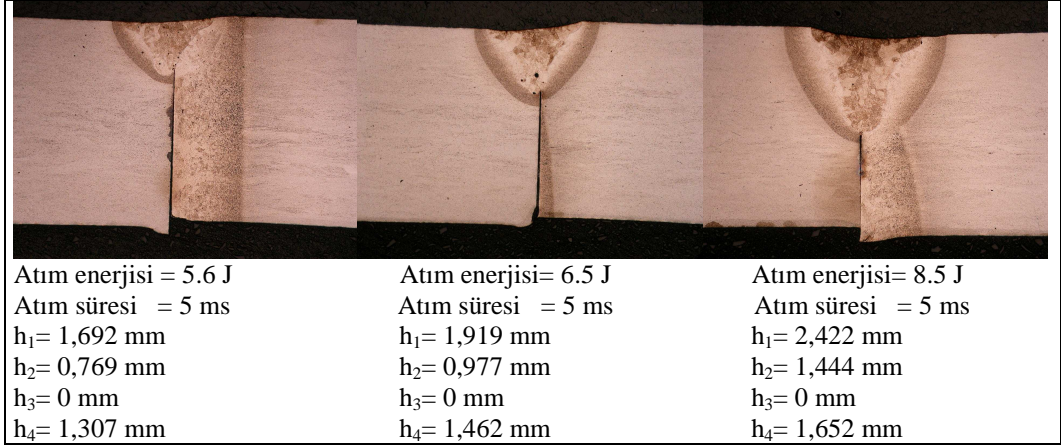
Şekil 5.2: Atım enerjisinin kaynak havuzu derinliği üzerindeki etkisi.

Enerji artışıyla meydana gelen diğer bir etki metal yüzeyindeki ısıdan etkilenmiş bölgedeki değişimdir. Kaynak bölgesi üzerinde plazmanın neden olduğu soğurma oldukça fazladır. Bu noktada elde edilebilir enerji oldukça yüksek bir hal alır. Bundan dolayı yüzeyde ısıdan etkilenmiş bölgede bir genişleme söz konusu olmaktadır. Enerjideki artışın yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliğine etkisi Şekil 5.3 de gösterilmektedir.



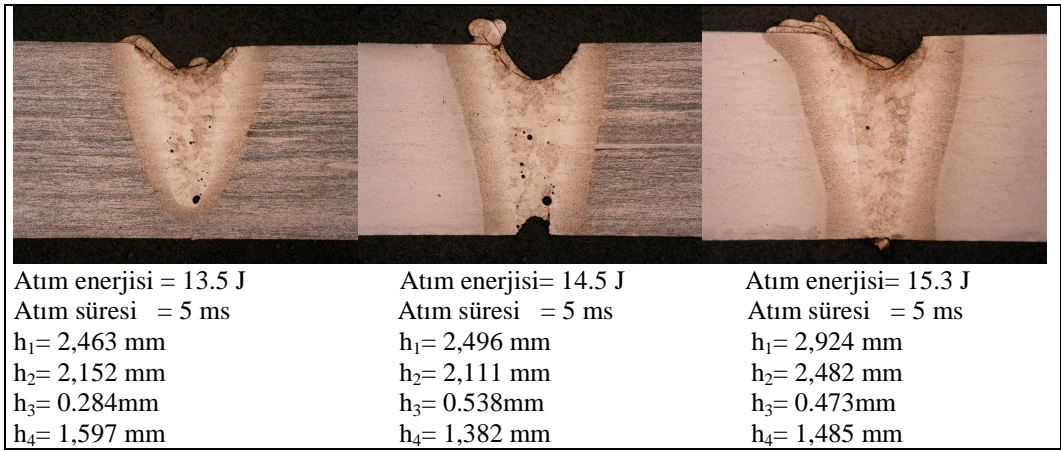
Şekil 5.3: Enerjideki artışın yüzeydeki ısıdan etkilenmiş bölgenin genişliğine etkisi

Kaynak işleminden sonra numunelerin optik mikroskoptan elde edilen görüntüleri Şekil 5.4'deki gibidir.



Şekil 5.4: Optik mikroskop ile çekilmiş fotoğraflar. Tüm parametreler sabit tutulurken atım enerjisi artışının etkisi görülmektedir.

Tepe gücü gerekenden fazla arttırıldığında aktarılan enerji titanyum alaşımların erime noktasının çok üzerine çıktığı için kaynak havuzunun üst yüzeyinde kraterler oluşmaya başlamıştır. Kraterlerin derinliği tepe gücündeki artış ile artma göstermiştir. Optik mikroskop ile alınan görüntüler Şekil 5.5 de gösterilmektedir.

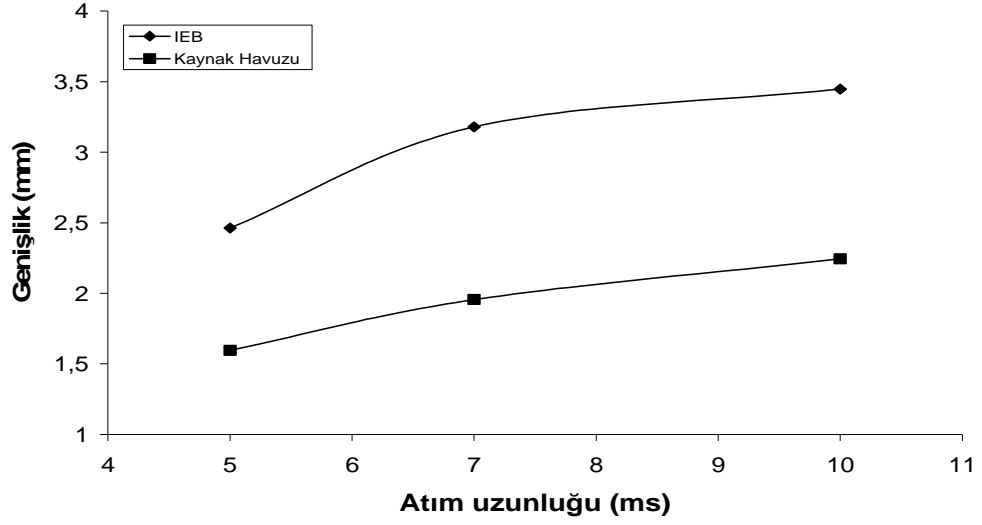


Şekil 5.5: Tepe gücündeki aşırı artış sebebiyle kaynak havuzu yüzeyinde oluşan krater derinlikleri enerji ile doğru orantılı şekilde artmıştır.

5.2 Atım Süresinin Kaynak Derinliğine Etkisi

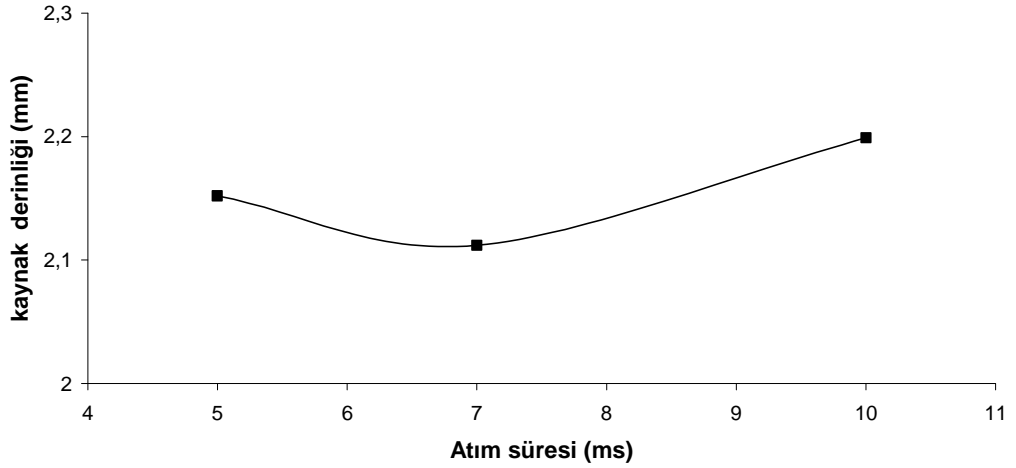
Sabit 2.7 kW tepe gücünde atım uzunluğunda meydana getirilen artış, lazerin atım başına enerji miktarının artmasına neden olmuş. Böylece lazer demeti ve metal arasındaki etkileşim süresi artmıştır. Etkileşim süresindeki artış, kaynak havuzu ve ısıdan etkilenmiş bölgenin (IEB) enine genişlemesine neden olmuştur. Şekil5.6'da

atım süresinin kaynak havuzu ve ısıdan etkilenmiş bölge üzerindeki etkisi görülmektedir.



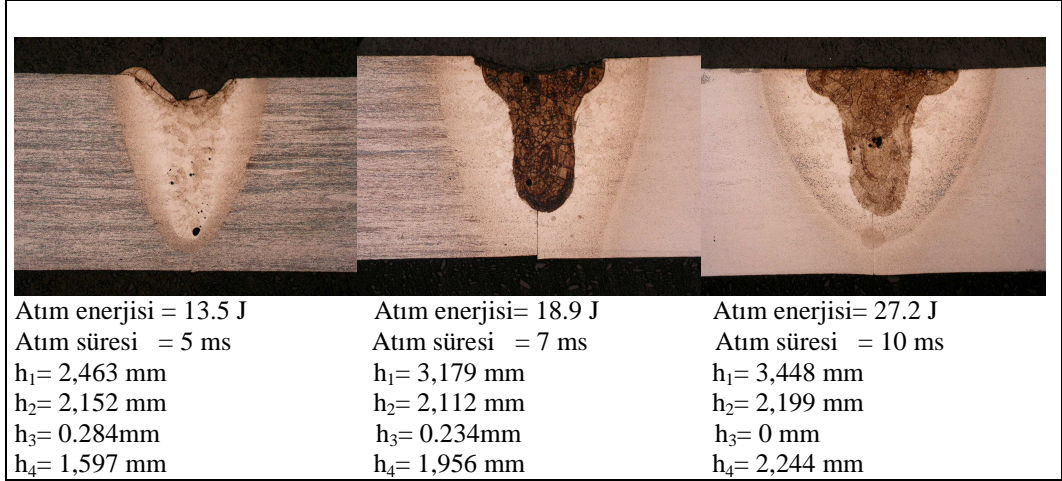
Şekil 5.6: Atım süresinde ki artışa bağlı olarak Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve kaynak havuzu genişliklerinde meydana gelen değişimler.

Atım süresinde yapılan değişim sırasında lazer tepe gücü 2.7 kW değerinde sabit tutulmuştur. Lazer atımları derinlemesine değil de genişlemesine nüfuz ettiği için kaynak derinliğinde dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Sabit tepe gücünde atım süresindeki değişimin kaynak derinliğine etkisi Şekil 5.7 teki gibidir.



Şekil 5.7: Sabit tepe gücünde lazer atım süresinin kaynak derinliği üzerindeki etkisi.

Optik mikroskop ile elde edilen fotoğraflar Şekil 5,8'deki gibidir. Atım süresindeki artış malzemeye aktarılan anlık enerjinin daha uzun bir zamanda aktarılmasını sağladığı için kaynak havuzu yüzeyinde oluşan kraterlerin derinliklerinde atım süresi ile ters orantılı olarak bir azalma gözlenmektedir.



Şekil 5.8: Sabit tepe gücünde atım süresinde meydana gelen değişimlerin incelendiği optik mikroskop ile elde edilmiş fotoğraflar.

5.3 Kaynak Hızı Ve Lazer Frekansının Kaynak Üzerindeki Etkisi.

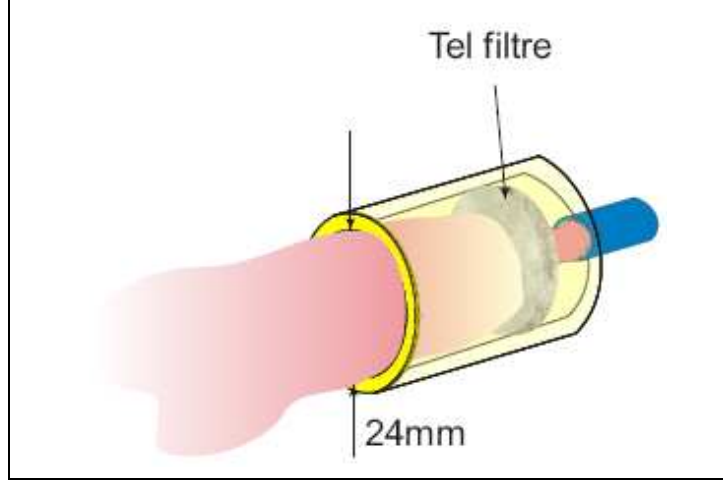
Atımlı lazerler ile dikiş kaynağı işlemi, periyodik bir şekilde tekrarlanan lazer atımlarının malzemeye yüzeyinde kısmen üst üste getirilerek kaynak bölgesinde bir eriyik veya dikiş oluşturması ile gerçekleştiği için lazer frekansı ve kaynak hızı arasında hassas bir denge vardır. Bu denge 3. bölümde belirtilen 3.15 denklemi ile sağlanır. Kaynak kalitesinin en iyi olduğu üst üste binme aralığı % 75-% 85 aralığında olduğu kabul edilmiş ve kaynak hızı ile frekansı bu orana göre belirlenmiştir.

5.4 Koruyucu Gazın Kaynak Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Kaynak çalışmaları süresince koruyucu gaz olarak helyum kullanılmıştır. Gaz kaynak bölgesine 24 mm çaplı bir gaz çıkış ünitesi yardımı ile uygulanmıştır. Kaynak işlemleri sırasında koruyucu gaz kullanılmaktaki amaç kaynak havuzunun kararlılığını ve erimiş metalin işlem süresince atmosferdeki gazlarla etkileşime girerek oksitlenmesini önlemek içindir.

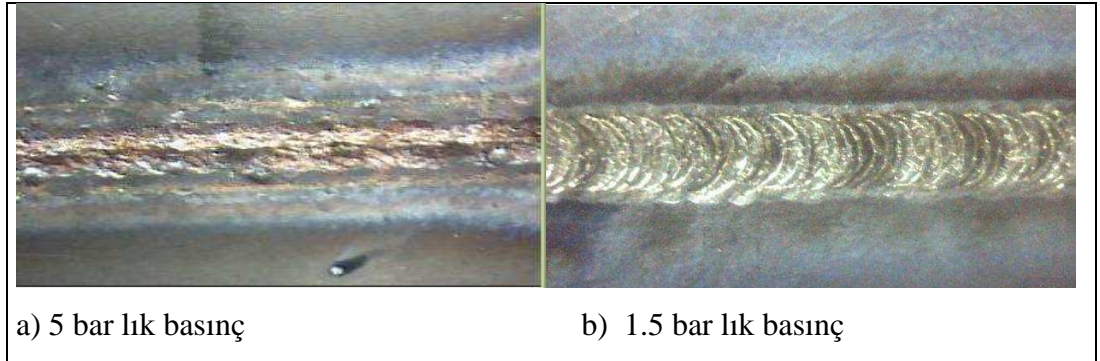
Gazın kullanımı sırasında dikkat edilecek nokta gaz basıncının metal yüzeyi üzerinde türbülansa neden olamamasını sağlamaktır. Oluşabilecek türbülansı engellemek için 24 mm lik çıkış ünitesinin içine tel filtre eklenmiştir. Bu sayede aktarılan gaz daha

yavaş ve geniş hacimde kaynak bölgesine ulaşmıştır. Kullanılan çıkış ünitesi Şekil 5.9 de gösterilmiştir.



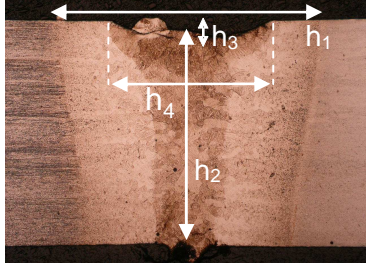
Şekil 5.9: Koruyucu gaz ünitesi. Çıkış ünitesine tel filtre ilave edilmiştir.

Gaz çıkışı sağlayan ünitenin çapı 24 mm olup yatay eksen ile 39 derece açı yapacak şekilde ayarlanmış ve lazer demeti ile eş zamanlı olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Yüksek ve düşük gaz basınçlı numuneler arasındaki fark Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10: Gaz basıncının kaynak havuzu kararlılığı ve oksidasyon üzerindeki etkisi. a) dizi şeklinde deliklerden oluşan ünite ile 5 bar helyum da elde edilen kaynak. b) 24mm çapında çıkış ünitesi kullanılarak 1.5 bar helyumla elde edilen kaynak.

Kaynak işlemlerinde parametrelerde yapılan değişiklikler sonucunda optik mikroskop görüntülerine göre en büyük kaynak derinliğine Şekil 5.11'de gösterilen parametreler ile ulaşılmıştır.

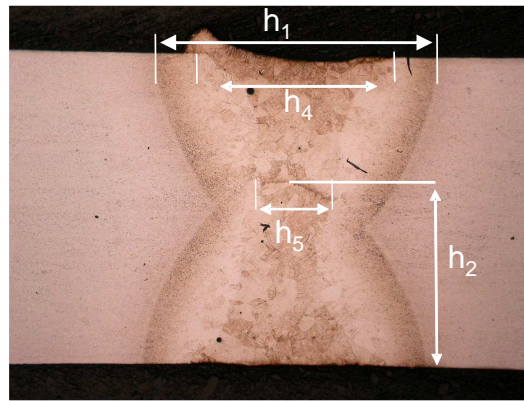
Odak pozisyonu	-2 mm	
Atım uzunluğu	10 ms	
Atım enerjisi	30 J	
Frekans	15 Hz	
Hız	3 mm/s	
Gaz basıncı	1.5 bar helyum	
		$h_1=3,448$ mm $h_2=2,820$ mm $h_3=0,153$ mm $h_4=2,167$ mm

Şekil 5.11: Tek taraflı kaynak yaparak optik mikroskop görüntülerine göre en iyisi olduğu düşünülen numune.

Lazer demetinin tek taraflı uygulanması ile yapılan çalışmalar sonucunda yüzey düzgünlüğü sağlanarak 3 mm derinliğe ulaşılamamıştır. Bundan sonra yapılan çalışmalarda lazer demeti Ti6Al4V alaşımların iki taraflarına uygulanmıştır. Bu çalışmalar sırasında tek taraflı kaynak işlemlerinde kullanılan parametreler çift taraflı kaynak için kullanılmıştır.

5.5 Çift Taraflı Kaynak Çalışmaları

Çift taraflı kaynak işlemleri sırasında optik mikroskop ile alınan görüntüler üzerinde mesafeler Şekil 5.12’de belirtildiği gibi simgelenmiştir.

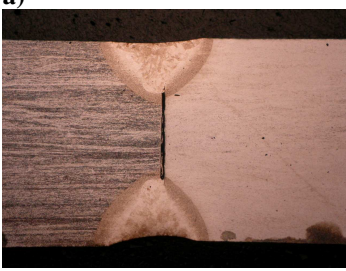
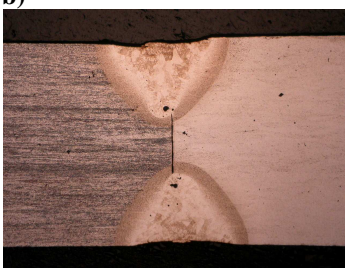
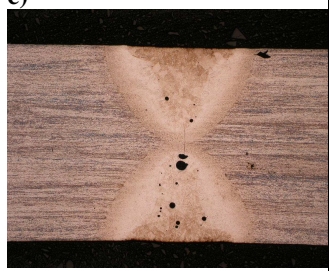
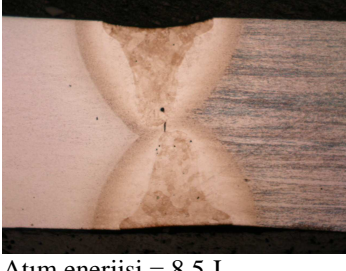


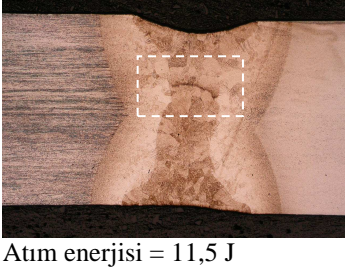
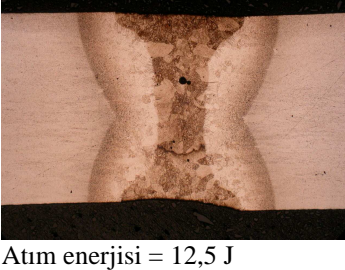
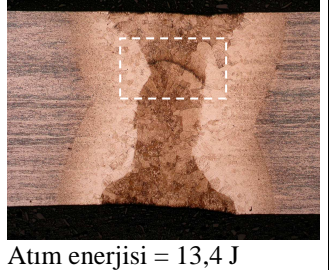


Şekil 5.12 Çift taraflı kaynak işlemlerinde mesafe ölçümü için kullanılan simgeler.

Çift taraflı kaynak çalışmalarına minimum tepe gücü ile başlanılmıştır. Kullanılan parametreler Tablo 5.2 de verilmektedir.

Tablo 5.2: Çift taraflı kaynak işlemlerinde kullanılan parametreler.

Atım Enerjisi (J)	5.6, 6.5, 7.6, 8.5, 9.6, 10.5, 11.5, 12.5, 13.4
Odak pozisyonu (mm)	-2 mm sabit tutulmuştur
Atım uzunluğu (ms)	5 sabit tutulmuştur
Frekans Hz	43 sabit tutulmuştur
Kaynak Hızı (mm/s)	5 sabit tutulmuştur
Gaz basıncı (bar)	1.5 sabit tutulmuştur

 <p>Atım enerjisi = 5,6 J Atım süresi = 5 ms $h_1=1,654$ mm $h_2=0,740$ mm $h_4=1,384$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 6,5 J Atım süresi = 5 ms $h_1=1,945$ mm $h_2=1,047$ mm $h_4=1,489$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 7,6 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,26$ mm $h_2=1,264$ mm $h_4=1,66$ mm</p>
 <p>Atım enerjisi = 8,5 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,353$ mm $h_2=1,40$ mm $h_4=1,588$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 9,6 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,694$ mm $h_4=1,784$ mm $h_2=1,769$ mm $h_5=0,683$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 10,5 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,806$ mm $h_4=1,790$ mm $h_2=1,822$ mm $h_5=0,676$ mm</p>
 <p>Atım enerjisi = 11,5 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,98$ mm $h_4=1,909$ mm $h_2=1,879$ mm $h_5=0,885$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 12,5 J Atım süresi = 5 ms $h_1=2,93$ mm $h_4=1,882$ mm $h_2=2,2$ mm $h_5=0,776$ mm</p>	 <p>Atım enerjisi = 13,4 J Atım süresi = 5 ms $h_1=3,189$ mm $h_4=1,992$ mm $h_2=2,12$ mm $h_5=0,935$ mm</p>

Şekil 5.13: Çift taraflı kaynak işlemi yapılan örneklerin optik mikroskop ile alınmış görüntüleri ve değişken olarak kullanılan enerji değerleri.

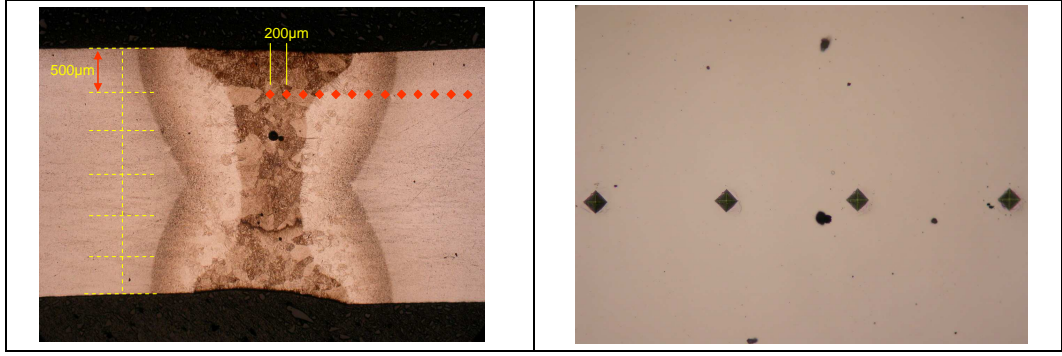
Şekil 5.13'den görüldüğü ve tek taraflı kaynak işlemlerinden de tespit edildiği üzere tepe gücündeki artış ile kaynak derinliği artmaktadır. Şekil 5.13 c ve d'de görüldüğü gibi, kaynak havuzunun malzeme içindeki uçları birbirine yaklaşmaya başladığında bu bölgelerde gözenekler oluşmaya başlar. Diğer bir yandan gözenekler metallerin birbirine iyi yanaşmamasından kaynaklanan hatalar nedeniyle oluşmuş olabilir. Şekil 5.13 g ve ı'da kaynak havuzlarının birleştiği noktada bir katman görülmektedir bu katman, ilk kaynak işlemi ile ısıl değişime uğrayan metalin, ikinci yüzeyin kaynak edilmesi ile iki kez ısıl etkileşime uğramasından ve bu noktada bir cüruf tabakası oluşmasından kaynaklanmaktadır. Oluşan tabaka ikinci yüzeye uygulanan işlem sonunda oluşan kaynak havuzunun dibine karşılık gelmektedir.

5.6 Vickers Sertlik Testi

Bir materyalin sertliği, bölgesel deformasyon gösteren bir katının direnci olarak ifade edilebilir. Sertlik ölçülerinin birçoğu, belli bir yük altında bir nokta veya bir ucun yüzeye nüfuz etmesine karşın gösterilen dirence dayanmaktadır. Vickers testleri, yaygın olarak metallerin sertliğini ölçme amacıyla kullanılmaktadır.

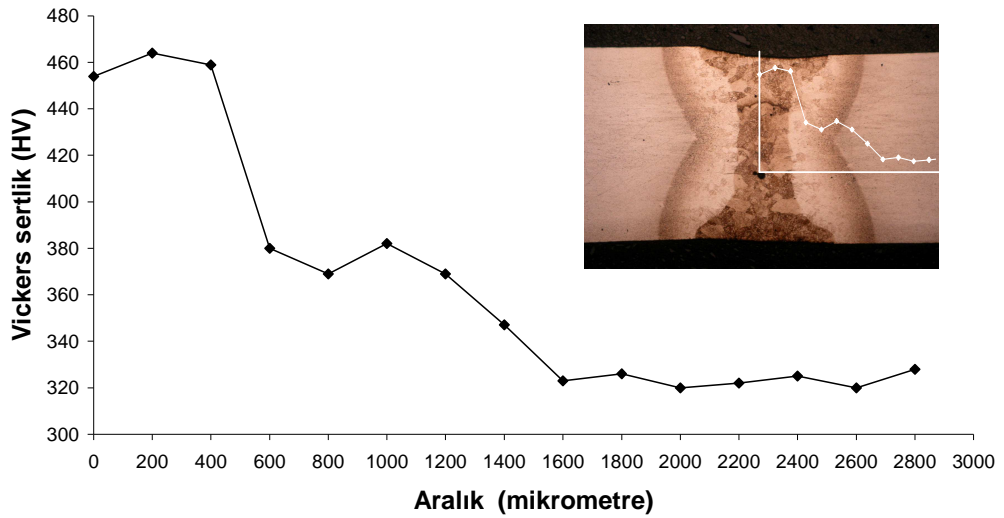
Bu deney yönteminde baskı elemanı olarak tepe açısı 136° olan elmas kare piramit kullanılır. Piramidin üstüne eklenen yük ile malzemeye bastırılan piramit uç malzemedeki bir iz bırakır. İzin ölçülmesi için cihaza ilave edilmiş metalurji mikroskopu kullanılır. Numune üzerinde meydana getirilen izin görüntüsü mikroskop yardımı ile ölçme ekranına aktarılır. Ölçme ekranındaki hareketli iki cetvel yardımıyla köşegen uzunluğu hassas bir şekilde ölçülür ve elde edilen veriler ile malzemenin sertliği hesaplanır.

Yapılan sertlik testinde test cihazında baskı yükü olarak 300 gr kullanılmıştır. Malzeme yüzeyinin 500 μm altında, kaynak havuzunun tam ortasından ölçüm yapılmaya başlanmıştır. Ölçümler 200 μm aralıklarla tüm örnekler üzerinde yapılmıştır. Testteki ayrıntılar Şekil 5.14'de görülmektedir.



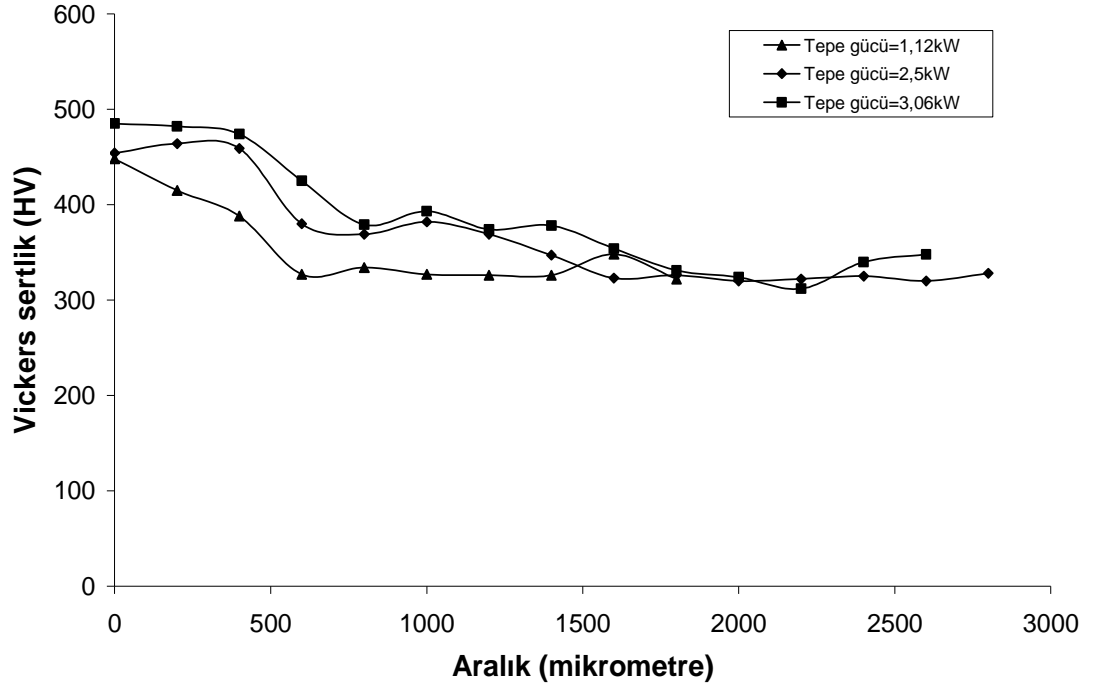
Şekil 5.14: Metal üzerinde Vickers sertlik testinin yapıldığı noktalar. Ölçme işlemi yüzeyin 500µm altından, eriyik havuzu ekseninden başlanarak 200µm adımlarla yapılmıştır.

Şekil 5.14’de gösterilen, atım enerjisi; 12.5 j, atım uzunluğu 5ms olan örneğin Vickers sertlik testi sonuçları Şekil 5.15 de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kaynak havuzunun merkezinde malzemenin sertliği oldukça yüksektir. Isıdan etkilenmiş bölgeye gelindiğinde sertlik azalır ve ana metalde en düşük değerine ulaşır. Lazer kaynak işleminde hızlı soğumadan dolayı ana metal ile kaynak metali arasındaki sertlik farkı oldukça fazla olmuştur. Kaynak bölgesi ile ana metal arasındaki fark yaklaşık 140 HV kadardır. Buradan anlaşılacağı gibi hızlı soğuma sertliği arttırmaktadır. Isıdan etkilenmiş bölgede ısınma iletimle sağlandığı için kaynak havuzuna göre daha azdır. Ana metal ile arasındaki fark 56 HV, kaynak havuzu ile arasındaki fark 84 HV dir.



Şekil 5.15: Enerjisi 12.5 J, süresi 5 ms olan atımın Vickers sertlik testi.

Numuneler üzerinde yapılan incelemelerde lazer tepe gücündeki artış ile sertliğinde arttığı gözlenmiştir. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilen numune ile daha az ve daha fazla enerji vererek kaynağı yapılan numunelerin sertlik karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 5.16: Farklı tepe güçlerine ait örneklerin vickers sertlik testleri.

Şekil 5.16'dan anlaşılacağı gibi özellikle kaynak bölgesinde tepe gücündeki artış daha fazla ısının malzemeye aktarılmasına neden olmuş ve sertliğin daha fazla olmasına neden olmuştur.

BÖLÜM 6 SONUÇ

Bu tez çalışmasının amacı lazer ile kaynak işlemlerini incelemek ve kaynama noktası yüksek olduğu için geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi zor ve masraflı olan Ti6Al4V titanyum alaşımların atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak birleştirme işlemlerinin yapılmasıdır.

Çalışma sırasında, lazerlerin yapısı ve çalışma prensipleri, günlük hayatımızdaki yeri ve özellikle sanayide kullanım alanları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince kullanılan atımlı Nd:YAG lazeri üzerinde özellikle durulmuş ve avantajları irdelenmiştir. Ti6Al4V alaşımı seçilmesindeki en önemli neden insan vücuduna en iyi uyum sağlayan bir alaşım olması nedeniyle insan sağlığı için çok önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra titanyum malzemeler uçak endüstrisinde çok fazla kullanılmakta ve geleceğimizin hava taşıtlarında çok fazla yer alacağı düşünülmektedir.

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. Tepe gücü belli bir değerin üzerine çıktığında anlık aktarılan enerjisinin fazlalığından dolayı malzeme yüzeyinde kraterler oluştuğu gözlenmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, sabit tepe gücünde lazer atım süresi artırılarak kaynak derinliğini artırma yoluna gidilmiştir. 2800 µm kaynak derinliğine yüzeyde oluşan 153 µm derinlikli krater ile ulaşılabilmektedir. Lazer frekansı, lazer kaynak hızına göre belirlenmiş, yüksek hızlarda çalışılmak istendiğinde 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. Gazlarla ilgili olarak dikkat edilmesi gereken diğer bir noktanın, gazın kaynak bölgesinde türbülansa neden olmasını engellemek olduğu

sonucuna varılmıştır. Aksi takdirde gazdan elde edilebilecek verimin düşeceği ve oksitlenme meydana geleceği görülmüştür.

Bu tez çalışması özellikle sanayide yapılan çalışmalar için çok önemli yararlar sağlayacaktır. Dünya sanayisinde her geçen gün kullanımı artan lazer sistemlerinin ülkemizde de kullanımının artmasında büyük etken olacak, geleneksel kaynak yöntemleri ile yapılması birleştirilmesi çok zor olan malzemelerin kullanımına imkan sağlayacak ve çeşitliliği arttıracaktır.

Günümüzde teknolojinin gelişimi ile birlikte, endüstriyel ve elektronik aletlerin boyutları küçülmekte, bununla birlikte mikro boyutlarda malzeme işlenebilirliğinin önemi ortaya çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bilgi birikimi ile kısa atım süreli lazerler kullanılarak mikro boyutlarda malzemeler incelenebilir ve işlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Silfast.W. T., "Laser Fundamentals", first edition, **Cambridge University**, 1-2, 1996.
2. A.Einstein, *Phys. Z.* "On the Quantum Theory of Radiation"18, 121-128, 1917.
3. Schawlow A. L., Townes C. H., " Infrared and Optical Masers", *Physical Review*, 112, 6, 1940-1949, 1958.
4. Mainman T. H., "Stimulated Optical Radiation İn Ruby" *Nature*, 187, 4736, 493-494, 1960.
5. Szöke A., Jawan A., " İso top Shift and Saturation Behavior of The 1.15-M Transition Of Ne", *Physical Review letters*, 10, 12, 521-524, 1963.
6. Hall R. N., Fener G. E., Kingsley J. D., Soltys T. J, and Carlson R. O., "Coherent Light Emission From GaAs Junctions", *Physical Review letters*, 9, 9, 366-368, 1962.
7. Patel C. K. N., "İnterpretation of CO2 Optical Maser Experiments", *Physical Review letters*, 12, 21, 588-590, 1964.
8. Geusic J. E., Marcos H. M., and Van Uitert L. G., " Laser Oscillations In Nd-Doped Yttrium Aluminum, Yttrium Gallium and Gadolinium Garnets", *Applied Physics Letters*, 4, 10, 182-184, 1964.
9. Sorokin P. P., and Lankard J. R., "Stimulated Emission Observed From an Organic Dye Chloroaluminum Phtalocyanine", *IBM Journal of Research and Development*, 10, 162, 1966.
10. N. G. Basov, V. A. Danilychev, Yu. M. Popov, and D. D. Khodkevich, "Laser Operating in The Vacuum Region of The Spectrum By Excitation of Liquid Xenon With an Electron Beam," *JETP lett.*, 12, 329-331, 1970.
11. Deacon D. A. G., Elias L. R., Madey J. M. J., Raiman G. J., Schwettman H. A., and Smith T. I., " First Operation of a Free-Electron Laser", *Physical Review letters*, 38, 16, 892-894, 1977.
12. D. L. Matthews, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen, M. J. Eckart, N. M. Ceglio, A. U. Hazi, H. Medeckı, B. J. MacGowan, J. E. Trebes, B. L. Whitten, E. M. Campbell, C. W. Hatcher, A. M. Hawryluk, R. L. Kauffman, L. D. Pleasance, G. Rambach, J. H. Scofield, G. Stone, and T. A. Weaver, "Demonstration of a Soft X-Ray Amplifier", *Physical Review Letters*, 54, 2, 110-113, 1985

13. Byond G., and Gordon J. P.,” Confocal Multimode Resonator For Millimeter Through Optical Wavelength Masers”, *Bell Syst. Tech. J.*, 40, 489, 1961.
14. Davis C. C., “Lasers and Electro-Optics Fundamentals and Engineering”, first edition, **Cambridge University**, 4-6, 1996.
15. Mechanical Electronic and Optical Systems,” Exp 18 Nd:YAG laser Workstation 80 W” **Germany**, <http://www.meos.com>, (**Ziyaret Tarihi: 10/05/2006**)
16. Laser Institute Of America, “Guide to Laser Materials Processing”, Sidney S. Charschan, *Laser Institute of America*, 44-55, (1993).
17. Miralles M., “Laser Hardining of Cutting Tools”, Yüksek Lisans, *Lulea Tekniska Universitet, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Engineering Materials*, 6, 2003.
18. Palais C. J., “ Fiber Optic Communication”, 3rd edition, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, 1992.
19. Craxton R. S., McCrory R. C., and Soures J. M., “Progres in Laser Fusion”, *Sci. Am.*, 255, 68-79, 1986.
20. Singleton D. L., Paraskevopoulos G., Jolly G. S., Irwin R. S., and McKenny D. J.,”Excimer lasers in cardiovascular surgery: Ablation products and photoacoustic spectrum of arterial wall,” *Applied Physics letters*, 48, 878-880, 1986.
21. Majumdar J. D. ve I Manna, “Laser processing of materials”, *Sadhana*, 28, 495–497. 2003, © Printed in India.
22. Witte K. J., Meyer-ter-Ven J., “Attosecond pulse generation and detection”, *Max-Planck-Institut für Quantenoptik*, <http://www.mpq.mpg.de/lpg/index.html>, (**Ziyaret tarihi: 10/05/2006**)
23. “Laser Applications” http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_applications, (**Ziyaret tarihi: 15/05/2006**)
24. Dorman C., “Femtosecond Illumination Moves From Technology to Microscopy”, *LaserFocusWorld*, Ağustos 2004 baskısı, 2004.
25. McKenzie A. L., ” Lasers in surgery and medicine”,*Phys. Med. Biol.*, 29, 619-641, 1984.
26. Yao Y. L., Chen H., Zhang W., “ Time Scale Effects in Laser Material Removal”, *Int J Adv Manuf Technol.* 2004.
27. Li Z., Gobbi S. L., Norris I., Zolotovskiy S., Richter K. H., “ Laser welding techniques for titanium alloy sheet”, *Journal of Materials Processing Technology*, 65, 203-208, 1997.

28. ISF, 2005, Laser Beam Welding, RWTHAACHEN University, <http://www.isf.rwth-aachen.de/>, (**Ziyaret tarihi: 02 Temmuz 2006**).
29. Li Q., Zheng Y., Wang Z., Zuo T., “ A Novel High-Peak Power Double AO Q-Switches Pulse Nd:Yag Laser For Drilling”, *Optics & Laser Technology*, 37, 357-362, 2005.
30. Han. W “Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging”, doktora, *Worcester Polytechnic Institute*, 49-51, 10 Mayıs 2004.
31. Verhoeven K.,” Modelling Laser Percussion Drilling”, doktora, **Technische Universiteit Eindhoven**, 2004.
32. Dr. Schuöcker Dieter, Absorption, Heating and Phase Changes, *Absorption of radiation*, http://info.tuwien.ac.at/iflt/safety/misc/ba_3_1.htm, (**Ziyaret tarihi: 15 haziran 2006**).
33. Ghany K. A., Newishy M., “cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and cw nd:yag laser”, *journal of metarials processing technology*, 2005.
34. Whitaker I R, McCartney D G. “The microstructure of CO2 laser welds in an Al-Fe-V-Si alloy”, *Mater Sci Eng*, A196:155-163,1995.
35. Hirose A., Fukumoto S. and Kobayashi Kojiro F., "Joining Processes for Structural Application of Continuous Fiber Reinforced MMCs": *Key Engineering Materials* 104-107, 853-872, 1995.
36. G. Wang and K. N. Tandon, “Compositional Changes in the Weld during Laser-Stainless Steel Interaction under Varying Gravity Conditions-Experiments aboard KC-135”, *Microgravity Sci. Technol.*, 8, 2, 131-133,1995
37. W.H. Cheng, W.H. Wang, and J.C. Chen, “Defect formation mechanisms in laser welding Technique for semiconductor laser packaging,” *IEEE Trans. Comp., Hybrids and ManuJTechnol.*, 19, 4, 764-769, 1996.
38. M. F. Lee, J. C. Huang, and N. J. Ho, "Microstructure and Mechanical Characterisation of Laser-Beam Welding of a 8090 Al-Li Thin Sheet", *J. Mater. Sci.*, 31,1455-1468, 1996.
39. L.W. Tsay and C. Y. Tsay, “The effect of microstructures on the fatigue crack growth in Ti-6Al-4V laser welds”, *Int. J. Fatigue*, 19, 10, 713-720 (1997).
40. Weckman, D.C., Kerr, H.W., Liu, J.T., “The Effects of Process Variables on Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welds”, *Metall. Trans. B.*, 28B, 687-700, 1997.
41. . El-Batahgy A M,”Effect of laser welding parameters on fusion zone shape and solidification structure of austenitic stainless steels”, *Mater. Lett.*, 32,155–63, 1997

42. Szymanski Z, Kurzyna J. and Kalita W., "The spectroscopy of the plasma plume induced during laser welding of stainless steel and titanium", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 30, 3153–3162, 1997.
43. Ng E S, Watson I A "Characterization of CO₂ and Diode Laser Welding of High Carbon Steels", *J. Laser Appl*, 11: 273–278 ,1999
44. Hirose A., Todaka H., Yamaoka H., Kurosawa M. and Kobayashi K. F., "Quantitative Evaluation of Softened Regions in Weld Heat-Affected Zones of 6061-T6 Aluminum Alloy - Characterizing of the Laser Beam Welding Process": *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 2115-2120,(1999).
45. Wang H.M., Chen Y.L., Yu L.G., "In-situ' weld-alloying/laser beam welding of SiCp/6061Al MMC", *Materials Science and Engineering: A*, 293, 1, 1-6, 2000,
46. Leong K H, Kirkham P A, Jr Meinert K C ,” Deep penetration welding of nickel-aluminum-bronze”, *J. Laser Appl*, 12: 181–184, 2000.
47. Biro E, Zhou Y, Weckman D C, Ely K J, “The effects of Ni and Au/Ni platings on laser welding of thin sheets”, *J. Laser Appl*. 13: 96–104, 2001.
48. Fuhrich T, Berger P, Hugel H., “Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel” *J. Laser Appl*, 13: 178–186, 2001
49. Hsu Y.T.; Wang Y.R.; Wu S.K.; Chen C, “Effect of CO₂ Laser Welding on the Shape-Memory and Corrosion Characteristics of TiNi Alloys” *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, 3, 569-576, 2001
50. Perret, O. Bizouard, M. Naudy, P. Pascal, G. Nore, D. Horde, Y.; Delaisse, Y. “Characterization of the keyhole formed during pulsed Nd-YAG laser interaction with a Ti-6Al-4V metallic target”, *Journal of Applied Physics*, VOL 90, pp 27-30, 2001.
51. Marya M, Edwards G R, “Factors Controlling the Magnesium Weld Morphology in Deep Penetration Welding by a CO₂ Laser”, *Mater. Eng. Performance*, 10, 4, 435-443, 2001
52. Svelto O., “Principles Of Lasers”, fourth edition, **Plenum Pres. Newyork and London, 370-373, 2004.**
53. Kramer M. A., Boyd R. W., “Three-Photon Absorption In Nd-Doped Yttrium Aluminum Garnet”, *Physical Review B*, 23, 986-991, 1981.
54. Wojcicki M. A. and Pryputniewicz R. J., , "Feasibility study of laser microwelding of high density cable assemblies with applications to portable electronics," *Proc. 47th Electronics Components and Technology Conf., San Jose, CA*, 905-910. 1997.

55. XIE. J, “Laser welding of sheet metals”, Doktora, **Department Of Mechanical, Materials And Aerospace Engineering In The College Of Engineering And Center For Research And Education In Optics And Lasers (Creol)**, University of Central Florida, 1-3, 1998 bahar dönemi.
56. DU J.,”laser welding of ultra thin stainless steel 316L sheets”, Doktora, **Department Of Mechanical, Materials And Aerospace Engineering In The College Of Engineering And Center For Research And Education In Optics And Lasers (Creol)**, University of Central Florida, 5-7, 2000 güz dönemi.
57. Irving B., “Lasers: Made in the U.S.A.”, *Welding Journal*, 71, 6, 67-73, 1992.
58. G. Casalino , F. Curcio , F. Memola Capece Minutolo,” Investigation on Ti6Al4V laser welding using statistical and Taguchi approaches”, *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 422–428, 2005.
59. Kugler T.,2003, “When Does Laser Welding Become Microwelding”, İngiltere, <http://www.gsiglasers.com/>, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2006).
60. Trumpf, 2000, “TLF Laser In Material Machining”, Almanya, <http://www.trumpf.com>, (Ziyaret tarihi: 20 Eylül 2006).
61. Abbott D., Albright C. E., “CO₂ Shielding Gas Effects in Laser Welding Mild Steel”, *Journal Of Laser Application*, 6, 69-80, 1994.
62. Duley W. W., “ Laser welding”, *John Wiley & Sons, Inc.*, 71-73, (1999).
63. Zhang Y., Li L., Zhang G.,” Spectroscopic measurements of plasma inside the keyhole in deep penetration laser welding”, *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 38, 703–710, 2005.
64. Beersiek , J., “On-line Monitoring of Key Hole Instabilities During laser Beam welding”, ”, *Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO’99, welding monitor, 2000.*
65. Arata Y., “Challenge of Laser Advanced Materials Processing”, *Proc. Con. Laser Advanced Materials Processing LAMP’87*, Osaka. May 1987. Japan High Temperature Society, pp. 3-11, 1987.
66. Jin X., Li L. and Zhang Y., “A study on fresnel absorption and reflections in the keyhole in deep penetration laser welding”, *Journal Of Physics D:Applied Physics*, 35, 2304–2310, 2002.
67. Özcan M. , Tarakcıoğlu N., Kahramanlı Ş., “Saç Malzemelerin Lazer Kaynak Parametreleri”, *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi*, 3, 1-13, 2004.
68. Precitec, ”Mechanisma during laser welding”, <http://www.a-l-e.net/docs/infoLWM.pdf>, (Ziyaret tarihi: 10 Nisan 2006)

69. K. Loeffler, "High-power CW Nd:YAGs advance", *Industrial Laser Review*, 13–16, Temmuz 1996.
70. Tzeng Y.-F., "Process Characterisation of Pulsed Nd:YAG Laser Seam Welding", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 10-18, 2000.
71. Tzeng Y.-F." Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process", *Journal of Materials Processing Technology*, 102, 40-47, 2000.
72. YUE T. M., XU J. H. and MAN H. C.," Pulsed Nd-YAG Laser Welding of A SiC Particulate Reinforced Aluminium Alloy Composite", *Applied Composite Materials*, 4, 53-64, 1997.
73. Baba N., Watanabe I., "Penetration Depth into Dental Casting Alloys by Nd:YAG Laser", *Wiley Periodicals, Inc. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater*, 72B, 64-68, 2005.
74. Demir A., Akman E., Canel T., Ertürk S., Kaya A. A. , Kenar N., Sınmazçelik T., Urhan O." Optimization of Nd:YAG laser welding of magnesium", *Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing*, basımda.
75. Shimokusu Y., Fukumoto S., Nayama M., Ishide T., Tsubota S.," application of High Power YAG Laser Welding to Stainless Steels Tanks", *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, Vol: 38, No:1, 2001.
76. 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 33 – 42, 2004.
77. Naeem m., 2004," Controlling the pulse in laser welding", <http://www.gsiglasers.com>, (**Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2006**)
78. Sibillano T., Ancona A., Berardi,V., Schingaro E., Basile G., Lugara P. M.," A study of the shielding gas influence on the laser beam welding of AA5083aluminium alloys by in-process spectroscopic investigation", *Optics and Lasers in Engineering*, (article in press)(Received 22 June 2005; accepted 6 September 2005).
79. Zhu J., Li L., Liu Z.," CO2 and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy", *Applied Surface Science*, (article in pres).
80. Light Test and Measurement Instruments, Laser Beam Profiler www.newport.com, (**Ziyaret tarihi: 20 mayıs 2006**)
81. Tek Ö., "Gözde bir metal titanyum", *Bilim ve teknik*, tübitak yayınları, 339, 50-53, 1993.

82. Fujii H., Takahashi K., Yamashita Y., “Application Titanium and Its Alloys for Automobile Parts”, *NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT*, 88, 70-75, 2003.
83. “Titanium and Titanium Alloys”, <http://www.key-to-metals.com/Article20.htm>, (Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2006)
84. Hummel R. C., “Titanium” ,2000, <http://ca2.csa.com/discoveryguides/titanium/overview.php>, (Ziyaret tarihi: 20 Temmuz 2006)
85. “Fort wayne metals” 2005, http://www.fwmetals.com/resources_specsheets/TI%206Al-4V_ELI.pdf, (Ziyaret Tarihi:25 Temmuz 2006)
86. Titanium Information Group, “Titanium Alloys – Ti6Al4V” <http://www.azom.com>, (Ziyaret Tarihi:10 Ağustos 2006)
87. Liu J., Watanabe I., Yoshida K., Atsuta M., “Joint strength of laser-welded titanium” *Dental materials*, 18, 143-148, 2002.
88. Yamagishi T., Ito M., Oshida Y., “Tensile strength and elongation of laser-welded titanium” 24, 42-51, 1999.

KİŞİSEL YAYINLAR

1. Demir A, **Akman E.**, Canel T., Ertürk S., Kaya A. A., Kenar N., Sınmazçelik T., Urhan O. "Optimization of Nd:YAG laser welding of magnesium", *Proceedings of the 4th International Congress on laser Advanced Materials Processing*. 2006. Basımda.
2. E. Akman, T. Canel, A. Demir, T.Sınmazçelik, " OPTIMIZATIN OF PULSED ND-YAG LASER PARAMETERS FOR TITANIUM SEAM-WELDING", *Sixth International Conference Of The Balkan Union Bpu-6*, 2006, Basımda.
3. E. AKMAN, A.DEMİR AND S.BİLİKMEN," Comparison Of The Stretcher And Compressor Designs In Femtosecond Laser Systems", **23'ncü Türk Fizik Derneği konferansı** 2005.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Balıkesir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fizik bölümünden 2004 yılında Fizikçi olarak mezun oldu. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Yüksek lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında Kocaeli Üniversitesi Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde Uzman olarak görev almaya başladı ve halen görevine devam etmektedir.