

**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEĞİŞİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE
KULLANILAN ND:YAG LAZERLERİ İÇİN ETKİN BİR GÜÇ KAYNAĞININ
TASARIMI VE UYGULANMASI**

Muciz ÖZCAN

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. A.B.D.

Konya, 2003

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİMLER VE TEKNOLOJİLER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ
BİLİMLER VE TEKNOLOJİLER GENEL MÜDÜRLÜĞÜ**

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

134265

DEĞİŞİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE
KULLANILAN ND:YAG LAZERLERİ İÇİN ETKİN BİR GÜÇ KAYNAĞININ
TASARIMI VE UYGULANMASI

Muciz ÖZCAN

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. A.B.D.

Konya, 2003

134265

**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

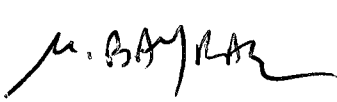
**DEĞİŞİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE
KULLANILAN ND:YAG LAZERİ İÇİN ETKİN BİR GÜÇ KAYNAĞININ
TASARIMI VE UYGULANMASI**

Muciz ÖZCAN

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez.....24/10/2003.....tarihinde aşağıdaki Jüri tarafından oy birliği/ ~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Mehmet BAYRAK
(Üye)


Prof.Dr. Novruz ALLAHVERDİ
(Üye)


Doç.Dr. Sirzat KAHRAMANLI
(Danışman)


Doç.Dr. Abdullah ÇAVUŞOĞLU
(Üye)


Yrd.Doç. Dr.Ramazan AKKAYA
(Üye)

ÖZET

Doktora Tezi

**DEĞİŞİK MALZEMELERİN İŞLENMESİNDE
KULLANILAN ND:YAG LAZERİ İÇİN ETKİN BİR GÜÇ KAYNAĞININ
TASARIMI VE UYGULANMASI**

Muciz ÖZCAN

**Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç.Dr. Şirzat KAHRAMANLI

2003, 157 Sayfa

Juri: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Doç. Dr. Abdullah ÇAVUŞOĞLU
Doç. Dr. Şirzat KAHRAMANLI
Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA

Nd:YAG (Neodimyum; Yttrium Alüminyum Garnette) lazerler, yaptığı yüksek kaynak kalitesi ve sağladığı yüksek verimlilik sayesinde, son zamanlarda endüstride yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, lazerle malzeme işlemenin avantaj, kalite ve verimi açısından çok önemli bazı problemler ve çözüm yolları ele alınmıştır. Bu sorunların başlıcaları; i) Kaynak hızının lazer güç yoğunluğuna bağlılığı ii) Belli bir derinlikte kaynak için, minimum enerji tüketimini sağlayan şartların belirlenmesi ve matematiksel olarak ifadelerinin elde edilmesi iii) Gereken lazer cihazının besleme ve kontrol devrelerinin tasarımının kolaylaştırılması için lazer gücü ile flaş lambasının temel parametreleri arasında var olan ilişkisinin kesinleştirilmesidir.

Yeni cihazlar için kontrol devresi ve güç kaynağı tasarımı (eleman düzeyinde), gerçekleştirilmiş ve uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Nd:YAG Lazer, Lazerle Materyal İşleme, Nd:YAG Lazer Güç Kaynağı

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

**THE DESIGN AND APPLICATION OF AN
EFFECTIVE POWER SUPPLY FOR Nd:YAG LASER
USED ON MACHINING OF VARIOUS MATERIALS**

Muciz ÖZCAN

**Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronic Engineering**

Supervisor: Doç. Dr. Şirzat KAHRAMANLI

2003, 157 Pages

Jury: Prof. Dr. Mehmet BAYRAK
Prof. Dr. Novruz ALLAHVERDİ
Assoc. Prof. Dr. Abdullah ÇAVUŞOĞLU
Assoc. Prof. Dr. Şirzat KAHRAMANLI
Assist. Prof. Dr. Ramazan AKKAYA

Nd: YAG laser based material processing has been widely used in the industry due to its high productivity and excellent welding quality.

In this study, some of the important problems and possible solutions within the context of productivity, quality and advantages of laser based material processing have been evaluated. They are namely:

- i) The fact of the dependency of welding speed to the laser beam power density.
- ii) For a given welding depth, obtaining mathematical expression providing the necessary conditions for minimum energy consumption.
- iii) Clarifying the relationship between the basic parameters of flash lamp and laser power to help the design of the power and control circuitry of the laser equipment. The design and implementation of control and power circuits (component based) within the context of new equipments have been realized.

Keywords: Nd: YAG Laser, Material Processing With Laser, Nd: YAG Laser
Power Supply

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında; danışmanlığımı üstlenen, bana ufuklar açan ve yetişmem için zahmetlerini esirgemeyen değerli Hocalarım Doç. Dr. Şirzat KAHRAMANLI ve Doç. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU'na teşekkür ederim.

Bizlere daima destekçi ve yol gösterici olan, tecrübe ve bilgisini bizler ile paylaşmaktan zevk alan hoşgörüsü ve efendiliği ile bizlere örnek olan değerli hocamız Prof. Dr. Mehmet BAYRAK'a, her türlü desteğini bizden esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Abdullah ÜRKMEZ ve Yrd. Doç. Dr. Ramazan AKKAYA'ya saygılarımı sunar teşekkür ederim.

Tez çalışmam esnasında, bana her türlü imkanlarını sunan, öğrendiklerimi ve düşündüklerimi uygulamak için geniş imkan ve fırsatlar tanıyan MEDİCAL 2000 firması çalışanlarına ve orada bir çok denemeyi birlikte yaptığımız, Elk. Elekt. Müh. Hidayet GÜNEY'a teşekkür ederim.

Muciz ÖZCAN
EKİM 2003

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER	xiii
KISALTMALAR	xv
SABİTLER	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı Ve Önemi	2
1.2 Nd:YAG Lazer İle Metal İşleme Üzerine Yapılan Çalışmalar	3
2. LAZER FİZİĞİNİN KISA ÖZETİ	7
2.1 Kendiliğinden Emisyon	7
2.2 Işığın Malzemeler Tarafından Yutulması	8
2.3 Tahrik Edilen Emisyon	9
2.4 Lazer Olayı	9
2.5 Lazer Cihazının Temel Elemanları	11
2.5.1 Aktif Ortam	11
2.5.2 Uyarma Mekanizması	12
2.5.2.1 Nüfus Terslemesinin Elde Edilmesi	12
2.5.3 Geri Besleme Mekanizması	13
2.5.3.1 Optik Çukur	13
2.5.4 Çıkış Bağdaştırıcısı	15
2.6 Lazer Işınının Karakteristikleri	15
2.6.1 Tek Renklilik	15
2.6.2 Uyumluluk	16
2.6.3 Uzaklaştıkça Dağılma	16
2.6.4 Yoğunluk	17
2.6.5 Yönlendirilebilirlik	18

2.7	Elektromanyetik aprazlaşma Modları	18
2.8	Güç Ve Enerji	19
3.	KATI HAL LAZERLERİN ESAS ELEMANLARI VE KAREKTERİSTİKLERİ	21
3.1	Katı Hal Lazer Çubuk Malzemelerin Özellikleri	21
3.1.1	Yakut Lazer Çubuk	22
3.1.2	Neodimyum :YAG Lazer Çubuk	25
3.1.3	Neodimyum : Cam Lazer Çubuk	27
3.2	Katı Hal Lazer Çubukların Optik Olarak Pompalanması	28
3.2.1	Flaş Lambası	29
3.2.2	Ark Lambası	31
3.2.3	Akkor Filamanlı Lambalar	33
3.2.4	Lazer Diyotlar	33
3.3	Optik Pompalamada Kullanılan Çukur Şekilleri	34
3.4	Katı Hal Lazer Cihazları	35
3.4.1	Yakut Lazer Cihazları	36
3.4.2	Nd:Cam Lazer Cihazları	36
3.4.3	Nd:YAG Lazer Cihazları	37
3.4.3.1	Sürekli Dalga Nd:YAG Lazer Cihazı	38
3.4.3.2	Darbeli Nd:YAG Lazer Cihazı	40
3.5	Nd :YAG Lazer Cihazının Ek Donanım Birimleri	41
3.6	Nd:YAG Lazer Cihazlarının Soğutma Sistemleri	42
3.7	Katı Hal Lazerlerin Esas Karakteristikleri Mukayesesi	43
4.	Nd:YAG LAZERLER İLE MALZEME İŞLEMENİN FİZİK TEMELLERİ VE TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ	46
4.1	Malzemelerde Isı Transferi	46
4.2	Lazer Işınının Metal Malzemelerle Etkileşimi	48
4.3	Metal İşleme Çeşitleri Ve Bunlar İçin Kullanılan Lazerler	50
4.3.1	Isıl İşlem	52
4.3.2	Delme İşlemi	53

4.3.3	Markalama İşlemi	53
4.3.4	Kesme İşlemi	54
4.3.5	Kaynak İşlemi	55
4.4	Lazerle Kaynak İşleminin Kalitesini Etkileyen Unsurlar	56
4.5	Lazerle Kaynağın Temel Prensipleri Ve Uygulama Alanları	57
4.5.1	Anahtar Deliği Yöntemiyle Lazer Kaynağı	57
4.5.2	Lazerle İletimsel Kaynak	60
4.6	Lazerle Kaynak İşleminin Avantaj Ve Dezavantajları	62
5.	KAYNAK İŞLEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ İÇİN EN ÖNEMLİ LAZER PARAMETRELERİ VE TEKNOLOJİK DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ	67
5.1	Lazer Işınının Güç Yoğunluğu	67
5.2	Bir Malzemenin Kaynak Yapılması İçin Gereken Kritik Lazer Güç Yoğunluğu	70
5.3	Kaynak İşlemi İçin Gereken Odak Çapı Ve Derinliği	73
5.4	Malzemelerin Kaynak Yapılması İçin Gereken Lazer Darbesinin Parametreleri	76
5.5	Lazer Darbesi Genişliği İle Erime Çukurunun Derinliği Arasındaki İlişki	77
5.6	Bir Lazer Darbesinin Taşıdığı Enerji Miktarı İle Malzemede Meydana Gelen Sıcaklık Arasındaki Bağını	78
5.7	Lazerle Kaynak Kalitesinin Malzeme Parametrelerine Bağlılığı	79
5.8	Lazer Işının Metaller Tarafından Yutulmasını Etkileyen Faktörler	83
5.8.1	İletimsel Lazer Kaynakta Malzemelerin Lazer Demetini Yutma Oranı	86
5.8.2	Anahtar Kaynağında Malzemelerin Lazer Demetini Yutma Oranı	87
5.9	Malzemeyi Lazerle İşleme Teorisi	87
5.9.1	Lazer Darbe Süresinin Belirlenmesi	87
5.9.2	Lazer Darbe Gücünün Ve Enerjisinin Belirlenmesi	88
5.10	Lazer Gücü Ve Kaynak Hızı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi	89
5.11	Lazer Kaynağı Sırasında Metalin Oksitlenmeden Korunması	90
5.12	Metal Saçların Birleştirilme Bölgelerine Karşı Talepler	93

5.13	Çelik Malzemelerin Lazer İle Kaynatılabilirliği	94
5.14	Lazer-Malzeme Etkileşimi Ve İşlem Modelleme Araştırması	94
5.15	İşlem Kontrolü Ve Kaynak Kalitesinin İzlenmesi	95
5.16	Belli Bir Lazer Cihazı İle Yapılabilecek Kaynak Derinliği Ve Hızının Belirlenmesi	97
5.17	Gereken Derinlik Ve Hızda Kaynak Yapabilmek İçin Lazer Cihazının Tipinin Ve Gücünün Belirlenmesi	100
5.18	Farklı Metallerin Kaynak Edilmesi	101
6.	METALLERİ İŞLEMELİK İÇİN Nd: YAG DARBELİ LAZER GÜÇ KAYNAĞININ TASARIMI	103
6.1	Giriş	103
6.2	Flaş Lambasının Seçilmesi	104
6.2.1	Flaş Lambasının Ömrü	107
6.2.2	Flaş Lambasının Patlama Enerjisi	108
6.2.3	Flaş Lambasının Elektriksel Direncinin Hesaplanması	109
6.2.4	Flaş Lambasının K_0 Parametresinin Hesaplanması	110
6.2.5	Flaş Lambası Üzerinden Deşarj Olacak Kondansatör Kapasitesinin Belirlenmesi	111
6.2.6	Flaş Lambasından Akan Akımın Tepe Değeri	112
6.3	Darbeli Lazer Güç Kaynaklarının Temel Elemanları	112
6.3.1	Enerji Depolama Ve Darbe Şekillendirici Devreler	114
6.3.1.1	RLC Deşarj Devresi	115
6.3.1.2	Faz Şekillendirici Deşarj Devresi	117
6.3.1.3	Darbe Şekillendirici Ve RLC Devrelerinde Kullanılan Elemanlarda Aranılan Özellikler	120
6.4	Flaş Lambasını Tetikleme Teknikleri	123
6.5	Nd:YAG Lazer Cihazlarında Güç Kayıpları	125
6.5.1	Besleme Kaynağındaki Güç Kayıpları	126
6.5.2	Flaş Lambasındaki Güç Kayıpları	126
6.5.3	Optik Çukurdaki Güç Kayıpları	127
6.5.4	Lazer Çubuktaki Güç Kayıpları	128

7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	129
7.1	Sonuç	129
7.2	Öneriler	130
8.	KAYNAKLAR	133
9.	EKLER	
Ek-I	Medikal 2000 Firmasında Tıbbi Alanda Kullanılmak Üzere İmal Edilen Lazer Cihazı	141
Ek-I	İmal Edilen Lazer Cihazına Ait Enerji Ölçüm Değerleri	153
Ek-III	Lazer Kaynağı Esnasında Karşılaşılabilecek Teknolojik Problemler	156



SİMGELER

a	: Bobinin çapı (inç)
A	: Malzemenin yutma katsayısı
D	: Odak lekesinin alanı(mm^2)
D_c	: Doluluk oranı(duty cycle)
E	: Kondansatörün depoladığı enerji
$E_{\text{çg}}$	: Lazer çıkışında elde edilecek enerji miktarı
$E_{\text{öl}}$	: Lazer çıkışındaki ölçülen enerji
E_p	: Darbenin enerjisi
c	: Malzemenin ısı kapasitesi
D_d	: Merceğin yerleştirildiği düzener çapı
d_f	: Odak derinliği
d_{fl}	: Flaş lambası tüpünün çapı
$E_{\text{flaş}}$	: Flaş lambasının ürettiği enerji
E_p	: Darbe enerjisi
E_{pl}	: Flaş lambasının patlama enerjisi
f	: Odaklama merceğinin odak uzaklığı
$f_{\text{ç}}$	: Çevrim frekansı
$h_{\text{(cm)}}$	: Erime havuzunun derinliği
I_0	: Şualandırma yoğunluğu
I_A	: Malzeme tarafından yutulan güç yoğunluğu
$I_c^{(1)}$	: Malzeme yüzeyini erime sıcaklığına ulaştıracak güç yoğunluğu
$I_c^{(3)}$	: Malzeme yüzeyini buharlaştırma sıcaklığına ulaştıracak güç yoğunluğu
k	: Malzemenin ısı iletimi
k_0	: Işının odaklanma hususlarına bağlı olarak yoğunlaşma katsayısı
K_0	: Lambanın dinamik empedansı
L_a	: Ark uzunluğu
L_c	: Uyumluluk mesafesi
m_f	: Odak leke alanındaki eriyecek malzemenin kütlesi
n	: Yansıtma katsayısı
N	: LC devresi sayısı
n_s	: Sarım sayısı

P	: Lazer demetinin gücü
P_{avg}	: Ortalama güç
P_d	: Ortalama tepe güç yoğunluğu(kW)
P_f	: Flaş tüpüne doldurulan gazın basıncı(300-400 mm/hg,Torr)
P_{in}	: Elektrik giriş gücü
P_{out}	: Lazer çıkış gücü
P_P	: Ortalama tepe gücü(kW)
P_{pk}	: Tepe darbe gücü
P_{rr}	: Darbe tekrarlama oranı
R_s	: Malzeme yüzeyinin yansıtma katsayısı
T_b	:Malzemenin erime noktası
T_m	: Kaynak edilecek malzemenin erime noktası
t_{ts}	: Tetikleme darbesi süresi
T_v	: Malzemenin buharlaşma sıcaklığı
Q	: Enerji miktarı
V	: Kaynak hızı(x eksen yönünde saç malzemenin ilerleme hızı)
W_0	: Odak noktasında meydana gelen lekenin(spot) yarıçapı
W_1	: Odaklama merceğine çarpan ışının demet yarı çapı
Z_m	: Malzemenin kalınlığı
Z_{max}	: Kaynak derinliği
ν	: Tahrik edilen emisyonda ortaya çıkan fotonun frekansı
η_{flas}	: Flaş lambanın verimi
η_{lazer}	: Lazer verimi
λ	: Dalga boyu
τ_p	: Darbe süresi
θ	: Demet uzaklaşması(Radyan veya Derece)
M^2	: Lazer ışın demeti kalitesi
ρ_k	: Deşarj anında Ksenon plazmasının öz direnci
ω	: Lazer ışınının açısal hızı($2\pi\nu/\lambda$)
ρ_{DC}	: Malzemenin doğru akım direnci(Ω/m).
ε_s	: Cismin siyahlık derecesi

KISALTMALAR

ANSI	: Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü(American National Standards Institue)
AO	: Akusto-Optik(Acousto-Optic)
CE	: Çelik malzemelerin karbon eşitliği
COIL	: Kimyasal Oksijen İyot Lazer(Chemical Oxygen Iodine Laser)
CVL	: Bakır Buharı Lazeri(Copper Vapour Lazer)
CW	: Sürekli Dalga(Continuous Wave)
FR	: Tam Yansıtıcı(Full Reflectivity)
HAZ	: Isıdan Etkilenen Bölge(Heat Affected Zone)
HR	: Yarı Yansıtıcı(Half Reflectivity)
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu(International Electrotechnical Commission)
İ	: İyi
K	: Kaynatılamaz
LASER	: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
M	: Mükemmel
MASER	: Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Nd	: Neodimyum (Lazer elde etmede kullanılan katkı elementi)
Nd:CAM	:Neodimyum Cam Lazer
Nd:YAG	: Neodimyum Lal taşı(Yttrium-Aluminium-Garnet) Lazer
Nd:YLiF ₄	: Neodimyum dopingli İtriyum Lityum Flüorit (YLF)
Nd:YVO ₄	: Neodimyum dopingli İtriyum Vanadate
O	: Orta
PRR	: Darbe Tekrarlama Oranı(Pulse Repetition Rate)
TEAL	: Çaprazlama Uyarmalı Atmosferik Lazer (Transverse Excited Atmospheric Lasers)
TEM	: Elektromanyetik Çaprazlaşma Modları (Transverse Electromagnetic Modes)
XeF	: Ksenon Florid Lazer (Xenon Fluoride Laser)
YAG	: Lal taşı (Yttrium-Aluminium-Garnet)
Z	: Zor

SABİTLER

C	: Işık hızı (Vakum edilmiş ortamda $2,998 \times 10^8$ m/s, ya da 300×10^6 m/s)
h	: Plank sabiti (6.62×10^{-34} js; $4,135 \times 10^{-15}$ ev/Hz)
K	: Boltzman sabiti (1.381×10^{-23})
k_{si}	: 90 (sihirli sayı)
nm	: Nanometre (1×10^{-9} m)
μm	: Mikrometre (1×10^{-12} m)
1J	: Joule (10^7 erg; 0.239 kalori)
x_s	: Sihirli sayı (Ksenon gazı için 450, Kripton için 805)
f	: Femto (1×10^{-15})
ε_0	: Uzayın permabitesi ($1/(36 \cdot \pi \cdot 10^{-9}), F/m$)



1. GİRİŞ

1954'te Robert H. Dicke nüfus terslemesi durumunu oluşturmak için kısa süreli bir darbe kullanma fikrini ortaya attı. Söz konusu nüfus terslemesi, kendiliğinden emisyon ile şiddetli bir patlama üretecekti. 1957'de Gordon Gould, lazeri oluşturacak Fabri-Perrot boşluğunu tasarladı. 1958'de Schawlow ve Townes bir optik malzemenin yapısının çeşitli durumlarını açıklayan "Infrared and Optical Masers" başlıklı bir makale yayınladılar. Bu makalede, lazerlerin uygulanabilirliği konusunda birçok soru tartışılıyordu. 16 Mayıs 1960'ta, Maiman ve arkadaşları "pembe" bir yakut çubukta lazer olayını gerçekleştirdiler (Maiman 1960). Maiman'ın gösterisinden sonra çok geçmeden IBM'den Sorokin ve Stevenson, uranyum katkı kalsiyum flüor lazerleri için flaş pompalı çubuk tasarımında çalıştılar. Bu lazer Kasım 1960'ta ilk denemede başarılı oldu. Birkaç hafta sonra, Sorokin ve Stevenson samaryum katkı kalsiyum flüorür lazer etkisini elde ettiler (Sorokin 1960). Katkı kalsiyum flüorür günümüzde yaygın olarak kullanılan lazer etkisinin ilk gösterileriydi. 12 Aralık 1960'ta Ali Javan, William R. Bennet ve Donald Herriot Neon-Helyum gaz karışımında lazer etkisini elde ettiler. Yakut lazeri takiben 1961 yılında Neodimyum lazer geliştirilmiştir. 1963'te C. Kumar, N. Patel karbondioksit, 1964'te Joseph Geusic, H. M. Marcos ve Le Grnd Von Uiter Nd-YAG'da ve William Bridges argon-iyonda lazer etkisini elde ettiler (Geusic 1964). Bugün lazerler katı, sıvı, gaz ve plazma materyallerinde ve hemen hemen her dalga boyunda elde edilebilmektedir (Kuhl 1998).

Kırk yılı aşan bir geçmişe sahip lazer, keşfedildiği günden günümüze kadar uygulama alanı bulmuştur. Gittikçe genişlenmekte olan bu alanlara örnek olarak, tıp, biyoloji, kimya, elektronik, metroloji, meteoroloji, makine sanayide malzeme işleme teknikleri gösterilebilir. Lazerler askeri amaçlı mesafe ve hız ölçme yoluyla hedef tayini, uydu haberleşmesinde kullanılır. Global pozisyon sistemlerinde lazer jireskoplar uçakların, gemilerin, tankların, füzelerin yöneltmesi, güdümünde, kullanılır. Holografi (üç boyutlu görüntü elde edilmesi) ve tıpta lazerlerin ilk uygulamaları gözde olmuştur. Günümüzde karaciğer, kalp, mide ameliyatlarında Nd:YAG lazer cihazları kullanılmaktadır. Değişik dalga boylarında ışın üreten lazerler ile doku kesme, kanamayı durdurma, gereksiz damarların kurutulması (varis, damar çatlakları vs.), kanserli hücre ve dokuların yok edilmesinde kullanılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı Ve Önemi

Bu tez çalışmasında metal malzemelerin kesilmesi, kaynak yapılması ve delinmesi için, flaş lambası pompalamalı darbeli Nd:YAG lazer için; işlem parametrelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Metal malzemelerin kesilmesi, kaynak yapılması ve delinmesi işlemleri, otomatik imalat proseslerinin organizasyonunda önemli aşamalardır. Hassas imalat ortamında lazer cihazları önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu tezde kesme, delme ve kaynak işlemleri gibi sanayiye yönelik önemli ve hassasiyet isteyen çalışmaların tamamı lazer kullanılarak yapılmıştır. Bu bağlamda söz konusu işlemlerin teknolojik talepleri ciddi bir şekilde yerine getirilebilmesi için, işlem parametrelerinin gereken değerleri belirlenmiş ve bu değerleri sağlayacak olan lazer sisteminin tasarımı , üretimi ve sanayi uygulaması üzerinde durulmuştur (Ek-I).

Aşağıdaki sebeplerden dolayı, lazerle kaynak işlemi dünya çapında çok geniş bir şekilde uygulanmaktadır:

- Otomasyona yönelik olması,
- Kaynak bölgesinin düzgün ve temiz olması,
- Malzeme özelliklerinin belirli sınırlar dahilinde değişmesi,
- Kaynak sonrası temizleme işlemleri gerektirmemesi.

Fakat, Ülkemizde lazerle imalat işlemleri yeterince gelişmemiş durumdadır. Bundan dolayı, sanayimiz aşağıdaki olumsuzlukları yaşamaktadır. Bir çok firma, bir malzemenin kaliteli olarak kaynatılamamasından dolayı ortaya çıkan kaynak hataları bakımından önemli tenkitler almakta ve buna bağlı olarak da ürettiği malzemeleri ihraç etmede ciddi problemlerle karşılaşmaktadır. Bu yüzden, imalatçı firmalar, mamüllerinin kaynak izlerini gizlemek için boyama, başka bir malzeme ile kaplama veya zımparalama gibi bazı ek işlemler yapmak zorunda kalmaktadırlar. Çoğu önemli kaynak işlemleri, lazer yöntemi dışındaki diğer yöntemlerle yapılamadığından, sanayicilerimizin bu tip mamulleri standarda uygun olarak üretmeleri mümkün olamamaktadır. Eğer, lazer uygulamaları sanayicimizin kullanım alanına yaygın olarak girerse, bu tür olumsuzluklar önlenecek ve zaman içinde ülkemizin kaliteli mamül ihracat potansiyeli önemli ölçüde artacak, iç piyasaya yönelik düşük maliyetinin yanında yine standarda uygun mamullerin üretilmesi mümkün olacaktır.

Lazer demet kaynağı durumunda; elektron demet kaynağı için gerekli olan vakum ortamına ihtiyaç duymaksızın ve kaynak işlemi esnasında X ışınlarına maruz kalmaksızın kaynak işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Lazer ışık demetinin yüksek derecedeki uyumluluğundan dolayı, çok küçük noktasal bir alana 10^9 W/cm² nin üzerinde bir güç yoğunluğunun odaklanması mümkündür. Bu güç yoğunluğunda malzeme tabanında ısı yayılımı iletim mekanizması yolu ile çok hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Lazer kaynağında ışın demetinin odaklandığı çok küçük dairesel bir alandaki malzemeyi eritecek kadar enerjinin malzemeye uygulanması gerekir.

Lazer kaynağının değişik amaçla farklı tip malzemeleri kaynatmak için kullanım alanları teknolojik yönden son yıllarda bir hayli artmıştır. Günümüzde yapımı çok zor olan kompleks ürünlerin kalıplarını dökmek yerine, daha basit kalıplardan malzemelerin alt ürünlerini dökmek ve daha sonra da lazer kaynağı ile birleştirmek suretiyle istenilen ürünü üretmenin daha akılcı olduğuna inanılmaktadır.

Ayrıca, endüstriyel ihtiyaçları karşılamak amacıyla ithal edilecek çok pahalı lazer cihazları yerine, yerli teknolojiyle tasarımı ve üretimi yapılan benzeri lazer cihazların kullanılmasıyla ülkemizden yurtdışına döviz çıkışı önemli ölçüde önlenecektir.

Genelde lazer kaynağının maliyetinin düşük, kaynak kalitesinin yüksek olması ve kaynak işlemlerinin otomasyona yönelik bir biçimde gerçekleştirilmesi gibi bazı sebeplerden dolayı gelecekte sanayi kullanım alanlarının daha fazla genişleyeceği tahmin edilmektedir.

1.2 Nd: YAG Lazer İle Metal İşleme Üzerine Yapılan Çalışmalar

Przetakiewicz ve ark.(1994), Metallerin lazer kaynağı ile kaynak yapılması esnasında oluşan ısı dağılımının matematiksel modellenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Lazer ışın demeti malzeme yüzeyinde gezdirilirken ısı transfer fonksiyonun sınır değerlerine bağlı olarak diferansiyel çözümünün yapıldığını göstermişlerdir.

Anonim (1995), Lazer cihazında mevcut bulunan potansiyel tehlikelerden ve oluşabilecek tehlikeli durumlardan bahsedilmektedir. Lazer cihazının sınıflandırılmasına göre gözde meydana getirebileceği hasarlardan söz edilmektedir.

Haug ve Pristschow (1997), Ağır sanayide otomasyon ile kaynak işlemini gerçekleştirmek için lazer şerit algılayıcıların kullanılmasına yönelik bir çalışma yapmışlardır. Lazer kaynağı işleminin lazer şerit algılayıcı ile izlenmesinin kaynak kalitesi ve hızını, üretim verimliliğini artırdığını, kaynak işleminin el becerisi gerekmeden gerçekleştirilebileceği belirtilmiştir. Fakat lazer şerit algılayıcının çok pahalı (30.000\$) olması sebebiyle endüstride kaynak kalitesini izlemede yaygın olarak kullanılamadığından bahsetmektedirler.

Yılbaş ve ark. (1997), Nd:YAG lazerden elde edilen darbenin enerjisi 5-20 J, genişliği 10^{-6} s olan odak uzaklığı 51 mm olan mercek ile iş parçası üzerine 10^{12} W/m² güç yoğunluğunda odaklayarak çelik, nikel ve tantalum malzemelerin yüzey muayenesini ve malzeme içinde yapısal bir bozukluk olup olmadığını malzemede meydana gelen ısının dağılım şekline tahmin etme üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Brüggeman ve ark. (2000), Rst 37-2 çeliği ve AlMgSi0,7 alüminyum alaşımlı malzemeyi çıkış gücü 5 kW olan CO₂ lazer cihazı ile dolgu malzemesi kullanarak kaynatmışlardır. Kaynak bölgesinde ısının dağılım şeklini ısı algılayıcı bir kamera ile malzemenin ısınması ve soğumasını esnasında izlemişlerdir. Bu ısı dağılımı kaynak genişliğine ve nüfuz derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Malzeme yüzeyinde ısı değişimini izleyerek yeterince derinlikte kaynak işleminin gerçekleştiğini belirleme üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Abdullah ve Siddiqui (2001), Yaygın olarak kullanılan orta sertlikte ve paslanmaz çelik malzemeler Lumonic firmasına ait maksimum 400 W ortalama çıkış gücü ve maksimum darbe enerjisi 57 J. olan MS830 Nd³⁺: YAG lazer cihazını kullanarak kaynatılmışlardır. Kaynak işlemi ön ısıtılmalı ve kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonra ısıtılmalı olarak gerçekleştirilmiştir. İki şekilde kaynatılmış aynı özellikteki malzemelerin kaynak bölgesinin Vickers sertliği ölçülmüştür. Normal olarak kaynatılmış malzeme ile söz konusu yöntemlerle gerçekleştirilen kaynak bölgelerinin

malzeme Vickers sertliklerinin değişimi karşılaştırılmış olup kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonra kaynak bölgesinin ısıtılması durumunda malzemenin Vickers sertliğinin daha düşük olduğunu göstermişleridir. Kaynak bölgesinde malzeme sertliğinin artması istenmeyen bir özellik olduğundan kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonra ikinci bir lazer ışın demeti ile kaynak bölgesinin ısıtılması önerilmiştir.

Han ve ark. (2001), Nükleer santrallerde sıcak suyun dolaştığı kısımlarda borularda oluşabilecek oksitlenmeyi önlemek için kullanılan Inconel 600 ve 690 alaşımlarının lazer kaynağı ile kaynak yapılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 4-10 ms darbe genişliğine sahip, tekrarlama oranı 10-50 Hz., tepe gücü 1.7-4.1 kW olan Nd:YAG lazer kullanmışlardır. Inconel malzemenin derinlemesine nüfuz eden kaynak yöntemiyle kaynatmak için kaynak hızına bağlı olarak elde edilen kaynak nüfuz derinliğini 200 mm/dakika için 1.7 mm, 300 mm/dakika için 1.45 mm, 400 mm/dakika için 1.4 mm olarak ölçmüşlerdir. Kaynak işlemi esnasında koruyucu gaz olarak Nitrojen gazı kullanılmış olup akışkan hızı 55 litre/dak, kaynak yüzeyi ile meme arasındaki mesafe 7.5 mm lazer odak leke çapı ise 0.8 mm olarak seçilmiştir.

Martin ve ark. (2001), CCD kamera ile kaydedilen kaynak görüntü şeklinin nümerik modellemesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Elektrik akımı ile gerçekleştirilen kaynak da olduğu gibi, düşük frekanslı (darbe genişliği fazla olan, tekrarlama oranı daha az) anahtar deliği kaynağının kalitesinin iyi, yüksek frekanslı (darbe genişliği az, tekrarlama oranı fazla) anahtar deliği kaynağının kalitesinin daha kötü olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

Schubert ve ark. (2001), Taşıtların imalinde hafif malzemelerin kullanılmasının avantajlarından bahsetmektedirler. Hava taşıtlarının yapımında hafif malzeme olarak kullanılan alüminyum ve alaşımlarının lazer kaynağı ile kaynak yapılmasından ve avantajlarından bahsetmektedirler.

Schuöcker, (2001), Tepe gücü yüksek olan lazer cihazı kullanarak malzemelerin içinde olan hataların tespit edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Lazer ışının malzemede meydana getirdiği ısı dağılımının değişimi kafes yapısı ile yakından ilgili olduğu için bu özellikten faydalanarak malzeme yüzeyinden derinde olan kusurların

tespit edilmesi üzerine bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada optimum 0.08 m çapında bir dairesel alandaki hatanın tespit edilebileceğini önermiştir.

Fridenfalk ve ark. (2002), Otomasyona yönelik kaynak işlemini gerçekleştirmek üzere kaynatılacak malzemenin pozisyonuna ve kaynak tipine göre kullanılması gereken robot tiplerinin simülasyon yöntemi ile tespit edilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Miller ve ark. (2002), 1040 çelik şeridi robot kullanarak Nd:YAG Q anahtarlamalı lazer kaynağı ile gerçekleştirmişlerdir. Robotlar yardımıyla temassız olarak gerçekleştirilen kaynak kalitesi temassız elektromanyetik akustik algılayıcılar kullanarak izlenmiştir. Algılayıcıdan elde edilen veriler işlenerek optimum lazer kaynak hızı tespit edilmeye çalışılmıştır.

Park ve ark. (2002), Lazer kaynak işlemi esnasında meydana gelen plazma ve saçılmalar mor ötesi ve kızıl ötesi algılayıcı foto diyotlar yardımıyla izlenmişlerdir. Kaynak kalitesi optimum ve düşük enerji girişinde, kısmi olarak birbirine benzeyen malzemeler ve koruyucu gaz giriş memesinin değişik pozisyonlar için izlenmiştir. Algılayıcı olarak kullanılan diyotlardan elde edilen sinyaller çoklu-gelişmiş görüntü işleme yöntemi ile kaynak kalitesinin izlenerek istenen kalitede gerçekleştirilmesini sağlamışlardır.

Jin ve Li, (2003), Yüksek hızlı dijital kamera ile kararlı durumda anahtar deliği yöntemi ile malzemeler kaynatılırken meydana gelen kaynak çukurlarının şekli izlenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile anahtar deliği etrafındaki ısı yoğunluğu, anahtar deliği içinde sıcaklığın değişimini hesaplamışlardır.

Jin ve ark. (2003), 600 W., CO₂ lazerde elde edilen 15 mm çapındaki ışın demeti 100 mm odak uzaklığına sahip Ga As mercek ile iş parçasına odaklanmıştır. Yüksek hızlı kamera ile anahtar kaynağının gerçekleştirilmesi işlemi izlenmiştir. Anahtar deliğinin malzeme yüzeyindeki boyutlarının kaynak hızına bağlı olarak şekil değişimini izlemişler ve matematiksel modellenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

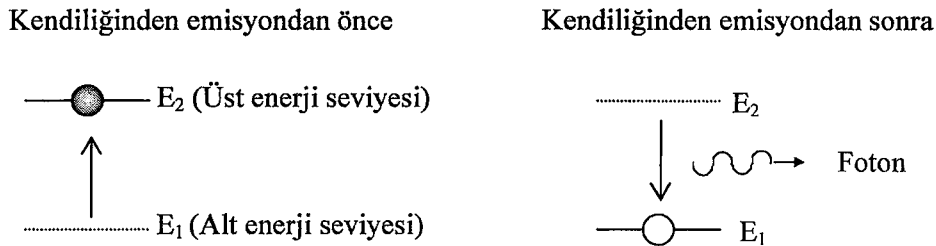
2. LAZER FİZİĞİNİN KISA ÖZETİ

2.1 Kendiliğinden Emisyon

Bir maddenin E_1 ve E_2 ($E_1 < E_2$) olmak üzere iki enerji seviyesi olduğunu farz edelim. Bu seviyeler bir madde için sonsuz sayıda olan enerji seviyelerinden yalnızca iki tanesini temsil etmektedir. Bunlardan birini E_1 toprak seviyesi olarak alalım ve başlangıçta E_1 enerji seviyesinde bir atom bulunduğunu farz edelim. E_1 enerji seviyesinde bulunan bu atom, E_2 enerji seviyesine ancak *uyarılma* denilen aşağıdaki şartlardan birinin yerine getirilmesi ile çıkabilir;

- Isıtılarak,
- Basınç uygulanarak,
- Hızlandırılmış elektronlarla bombardıman edilerek,
- Hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman edilerek,
- Bir ışık demetinin etkisine maruz bırakılarak.

E_2 enerji seviyesinde bulunan bir atom E_1 enerji seviyesine inmek isteyecektir. Bu atom E_2 enerji seviyesinden E_1 enerji seviyesine geçiş anında sahip olduğu $E_2 - E_1$ enerji farkını ortama bırakacaktır. Söz konusu atomdan açığa çıkan enerji, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, ortamda elektromanyetik dalga (foton) olarak yayılacaktır. Bu olaya kendiliğinden emisyon (*Spontaneous emission*) denir. Bir atom uyarılmış olarak, yaklaşık 10^{-8} s kalabilmektedir (Yariv 1989).



Şekil 2.1: Kendiliğinden emisyon

Yayılan dalgaının frekansı, ν formül 2.1 ile hesaplanır (Koechner 1992).

$$\nu = (E_2 - E_1) / h \quad (2.1)$$

Formülde; E_2 : Uyarılmış atomun bulunduğu enerji seviyesi, E_1 : Uyarılmış atomun düştüğü enerji seviyesi, h : Plank sabitidir.

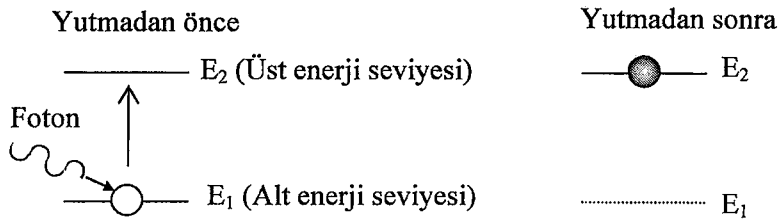
Atomun bıraktığı bu elektromanyetik dalgaya foton da denir. E_2 enerji seviyesinde bulunan bir atomun E_1 enerji seviyesine düşmesi sırasında açığa çıkan enerji formül 2.2'deki gibidir.

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (2.2)$$

Kendiliğinden emisyon olayında şöyle bir durumun olması da mümkündür. Atomun bir alt enerji seviyesine geçişinde elektromanyetik radyasyon olmayabilir. Bu durumda E_2-E_1 enerji farkı atomun kinetik enerjisinin artmasına sebep olur.

2.2 Işığın Malzemeler Tarafından Yutulması

Başlangıçta E_1 enerji seviyesinde bir atom bulunduğunu farz edelim. Toprak seviyesinde bulunan bu atom uyarılmadığı sürece bulunduğu seviyede kalmaya devam edecektir. Bu atoma frekansı ν olan bir elektromanyetik dalganın (foton) çarpması durumunda elektromanyetik dalganın sahip olduğu enerji atom tarafından yutulur. Yutulan enerji atomu, E_2 enerji seviyesine yükseltir. Atoma çarpan dalganın enerjisi E_2-E_1 enerji farkına dönüşecektir. Söz konusu olay yutma olarak tanımlanmaktadır (O'Shea 1978). Bu olay Şekil 2.2'de gösterilmiştir.

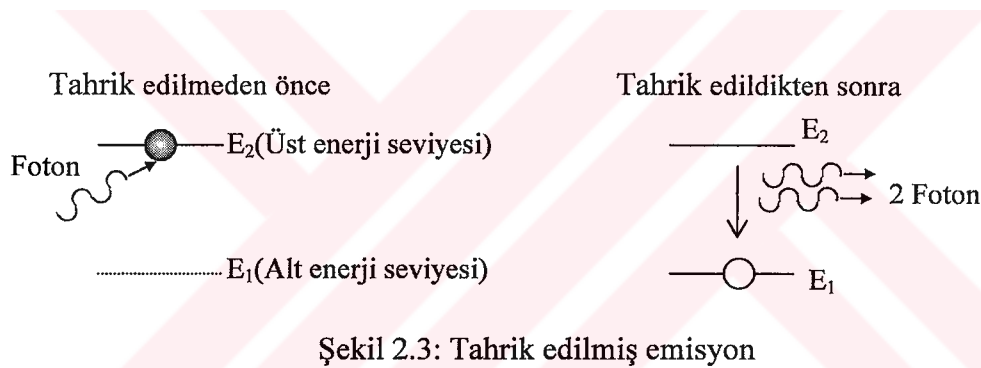


Şekil 2.2: Tahrik edilmiş yutma

2.3 Tahrik Edilen Emisyon

E_2 enerji seviyesinde bulunmakta olan bir atoma kendi atomik frekansı ile aynı frekanslı olan elektromanyetik dalga çarptığında bu atom E_1 enerji seviyesine geçecektir. Bu esnada $E_2 - E_1$ enerji farkı, çarpan elektromanyetik dalganın enerjisine ilave olunacaktır. Bu olaya tahrik edilmiş emisyon (*Stimulated Emission*) denir.

Kendiliğinden emisyon olayında bir atomun bıraktığı elektromanyetik dalga ile diğer bir atomun bıraktığı elektromanyetik dalga arasında bir faz ilişkisi yoktur ve gelişi güzel yayılma olur. Tahrik edilmiş emisyonda ise ortaya çıkan yeni dalga çarpan elektromanyetik dalga ile aynı yönde ve fazda olur (Şekil 2.3). Tahrik etme yolu ile uyarılmış atomun bıraktığı fotonun frekansı, enerjisi, yönü ve fazı tetikleyen (tahrik eden) fotonunki ile aynıdır. Bu tip emisyonda giren her bir fotona karşılık iki foton bırakılır (O'Shea, 1978).

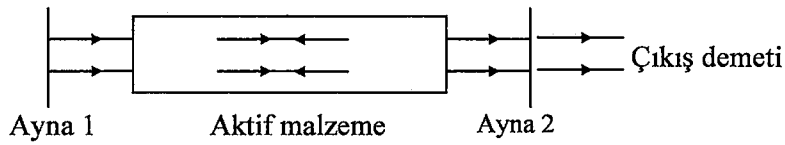


Şekil 2.3: Tahrik edilmiş emisyon

2.4 Lazer Olayı

Dalga frekansı mikrodalga bölgesine düşen yükselticiler *MASER* (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) olarak adlandırılır. Dalga frekansı görme bölgesine düşen yükselteçler ise *LASER* (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) olarak tanımlanır.

Yükselteçlerde osilasyon olayı elde etmek için pozitif bir geri besleme gerekir. Mikrodalga bölgesinde bu işlem, aktif materyalde belli bir frekanslı optik çukur kullanılarak gerçekleştirilir. Lazer durumunda ise geri besleme işlemi, aktif materyalin her iki ucuna yerleştirilen yansıtıcı aynalar ile yapılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4: Lazer olayının şematik gösterimi

Yansıtıcı iki ayna düzlemine dik olarak çarpıp, ileri-geri yansıyan elektromanyetik dalgalar aktif materyal tarafından yükseltilir. Elektromanyetik demeti çıkışa iletmek için aynalardan biri kısmi geçirgen yapılır.

Lazer materyalden ışın demeti elde etmek için aşağıdaki üç şartın sağlanması gerekir.

- Sistem, bir nüfus terslenmesi durumunda bulunmalıdır (yani, uyarılmış durumda, taban durumundakinden daha fazla atom olmalıdır),
- Sistemin uyarılmış durumu yarı kararlı bir durum olmalıdır. Böyle bir durumun ömrü, çoğunlukla kısa olan uyarılmış durum ömürleriyle karşılaştırıldığında daha uzundur. Böyle durumlarda uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımadan önce olur,
- Yayılan fotonlar diğer uyarılmış atomlardan uyarılmış ışımaya yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içerisinde tutulmalıdır. Bu durum, sistemin uçlarına yansıtıcı aynaların yerleştirilmesiyle sağlanır. Uçlardan birisi tamamen yansıtıcı olur, diğer uç ise lazer demetinin çıkışına izin verecek şekilde biraz geçirgen yapılır.

Lazer ortamından yayılan elektromanyetik dalganın boyuna göre lazerlerin adlandırılması Çizelge 2.1’de verilmiştir (Koechner 1988).

Çizelge 2.1: Işının dalga boylarına göre bölgelere ayrılması

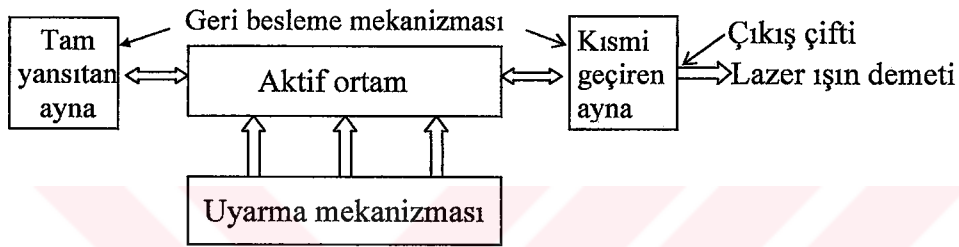
Özellik	Dalga boyu aralığı
Uzak kızıl ötesi	10-1000 μm
Orta kızıl ötesi	1-10 μm
Yakın kızıl ötesi	0.7-1 μm
Görülebilir	400-700 nm
Morötesi	200-400 nm
Vakum mor ötesi	100-200 nm
Aşırı mor ötesi	10-100 nm
X ışını	20-30 nm

2.5 Lazer Cihazının Temel Elemanları

Bir lazer ışık kaynağı elde etmek için aşağıda belirtilen dört adet fonksiyonel elemana gereksinim duyulur.

- Aktif ortam,
- Uyarma mekanizması,
- Geri besleme mekanizması,
- Çıkış bağdaştırıcısı.

Bu fonksiyonel elemanlar Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Lazeri oluşturan temel elemanlar

2.5.1 Aktif Ortam

Yalnızca nüfus terslemesine uğrayabilen malzemeler lazer için aktif ortam olarak kullanılabilir. Aktif ortam en alt enerji düzeyinde bulunan atomların sayısından uyarılmış durumdaki atomların sayısının fazla olması durumunu gerçekleştirmek için kullanılır.

Lazerin oluşması için gereken şartlardan ikisi aktif ortam tarafından sağlanır. İlk olarak, aktif ortamda atomlar foton yaymak üzere; kendiliğinden uyarım yapabilecek uyarılmış emisyon seviyelerinde bulunmaları gerekir. İkinci olarak, foton yayarak en alt seviyeye düşen elektronların sayısından; uyarılmış atomların sayısı fazla olacak şekilde en alt seviyeden elektronların uyarılmış seviyeye pompalanmaları gerekir. Düşük enerji seviyesinde bulunan elektronların sayısının yüksek enerji seviyesinde bulunan elektronlardan fazla olması durumunda dağılım tersine döner ve uyarılmış emisyon tarafından yayılan ışığın yükseltilmesi önlenir.

Aktif ortam optik bir yükseltece benzer. Aktif ortamın bir ucundan giren eşgüdümlü ışık demeti bu ortamdan geçerken; uyarılmış emisyonundan dolayı; eş

güdümlü ışık tayfının yoğunluğu artmış olarak aktif ortamın diğer ucundan çıkar. Aktif ortam lazerlerde optik kazanç sağlar. Aktif ortam;

- Gaz,
- Sıvı,
- Katı-hal,
- Yarı iletken.

olabilir. Sıvı (boya) lazerlerde boyanın etil veya metil alkol ile inceltilmesiyle, boyalı sıvılı aktif ortamlar oluşturulabilir. Diğer bir aktif ortam ise, gaz ve gaz karışımlarından elde edilebilir. Aktif gaz ortamlarında ortak örnek olarak, Helyum ve Neon gazlarının karıştırılması veya Karbondioksit gazı gösterilebilir. Yarı iletken aktif ortama örnek olarak, galyum arsenit ve galyum phosphiden içeren bir P-N eklemi verilebilir.

2.5.2 Uyarma Mekanizması

Aktif ortamda en alt enerji seviyesinde bulunan elektronların sayısından, uyarılmış durumda bulunan (yüksek enerji seviyesinde) atomların sayısının fazla olması için bir enerji kaynağı veya pompalanmadan uyarma mekanizması oluşur. Uyarma mekanizması, yarı iletken ve gaz lazerlerde aktif ortamdan elektrik akımı akıtılmak suretiyle gerçekleştirilir (Wang 1987). Katı ve sıvı lazerlerde ise, genellikle optik pompalama yöntemi kullanılır. Örneğin; yakut lazerinde yakut içerisinde bulunan Krom atomları Ksenon gazı içeren flaş lambasından yayılan güçlü ışık tarafından uyarılarak pompalama işlemi gerçekleştirilir.

2.5.2.1 Nüfus Terslemesinin Elde Edilmesi

Lazere ilave enerji verilerek Nüfus Terslemesinin elde edilmesi işlemi Pompalama olarak tanımlanır (Orazio 1994). Lazer tasarımında genellikle aşağıdaki pompalama yöntemlerinden biri kullanılır.

- Optik Pompalama,
- Elektron çarpması yöntemi ile pompalama,
- Atom çarpması yöntemi ile pompalama.

Optik pompalama yönteminde lazer ortamı (genellikle gaz veya katı malzeme) ışık kaynağı tarafından ışıklandırılır. Lazer ortamındaki elektronlar enerjisi kendisine uygun olan fotonların enerjilerini yutar ve atom içerisinde daha yüksek enerji seviyelerine atlarlar. Böylece atomlar uyarılır ve yeni fotonlar bırakmaya hazır vaziyete gelmiş olurlar (Yamamoto 1989).

Elektron çarpması yönteminde, elektron tabancası içinde atomların bulunduğu bir noktaya odaklanırsa içinde elektronlar olan atomlar vurulabilir. Eğer vuran elektronlar yeterli enerjiye sahiplerse, malzemede toprak seviyesinde bulunan atomları uyarabilir.

Atom çarpması yönteminde ilk olarak, genellikle elektrik boşalmasından sonra ortaya çıkan elektron, atoma çarparak onu uyarılmış duruma getirir. Sonra, bu atom lazer ortamında bir atoma çarparak enerjisini ona verir. Bunun sonucunda çarpan atom toprak seviyesine iner, çarpılan lazer atomu ise, uyarılmış vaziyete geçer. Eğer ortamda yeteri kadar uyarılmış atom varsa, Nüfus Terslemesi meydana gelir.

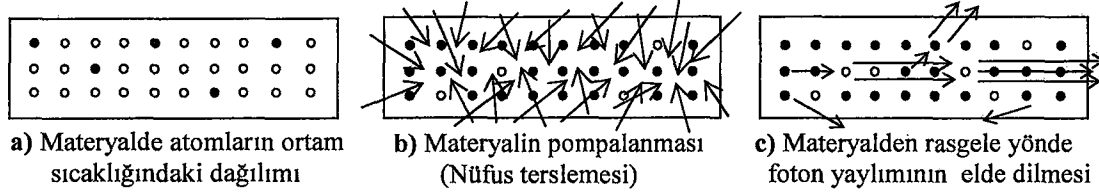
2.5.3 Geri Besleme Mekanizması

Geri besleme mekanizması, uyarılmış emisyonla daha fazla yükseltme işlemini gerçekleştirmek üzere; eş güdümlü olarak orijinal ışığın bir kısmını aktif ortama geri gönderir. Geri gönderilen ışığın miktarına, uyarılmış sinyalin uzunluğuna, eşgüdümlü olarak üretilen lazer ışığının miktarına, uyarılmış atomların çokluğuna ve uyarılmış sinyallerin kuvvetine (gerilmesine) bağlıdır. Geri besleme mekanizması genellikle iki ayna içerir. Aynalar aktif ortamın iki ucuna aktif ortamdan çıkan ışınlara dik gelecek şekilde yerleştirilirler. Geri besleme mekanizması aktif ortamdan geçecek eş güdümlü ışığın yansımalarını sağlar (Shimoda 1986).

2.5.3.1 Optik Çukur

Lazer için gerekenlerden biri de optik çukurdur. Pompalama sonucunda Nüfus Terslemesi olayı oluşuktan sonra, lazer süreci başlar. Fakat, ışık yükseltmesi

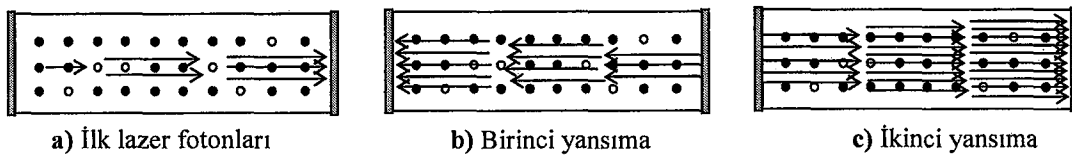
için bir rezonans ortamının olması gerekir. Bu ortamın olmadığı durumda oluşacak durumlar sırası ile Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Optik çukursuz ortamda foton hareketleri

Görüldüğü gibi, pompalama sayesinde Nüfus Terslemesi durumunda olan atomların bıraktığı fotonlar, lazer ortamının yanlarından ve baş taraflarından çıkarak lazer ortamını terk ederler. Şekil 2.6.(c)’de doğrusal olarak hareket eden fotonların atomlara çarparak yeni fotonların bırakılmasına sebep olduğu ve bu prosesin artarak lazer ortamının sağ duvarına kadar devam ettiği görülmektedir. Kullanılması mümkün olan ve gereken de bu olaydır.

Eğer lazer ortamının sağ ve sol taraflarına Şekil 2.7’de gösterildiği gibi birer ayna (kalın koyu çizgilerle gösterilmiştir) konulursa, elde edilen fotonlar, bu iki ayna arasında tekrar tekrar, sağa sola yansıtılıp, aktif ortamda bulunan atomlara çarpması sağlanarak elde edilecek foton sayısı çoğaltılabilir. Yani ışık yükseltme olayı elde edilmiş olur. Bu olay, yalnız iki yansıma durumu için, Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu yansımaların sayısı istenildiği kadar çok olabilir.



Şekil 2.7: Optik çukurlu ortamda foton hareketleri

Yükseltme süreci fotonların sağ ve sol aynalara çarptırılarak geri döndürüldüğü sürece devam edecektir. Yani, yansıyan fotonlar daha çok fotonun türemesine sebep olduğu için fotonların sayısı gittikçe artacaktır. Eğer aynalar % 100 yansıtıcı şekilde

ise hiçbir foton çukurdan çıkamayacak ve lazer çıkışı olmayacaktır. Pratikte aynalardan biri % 100 yansıtan, diğeri ise kısmen yansıtan şekilde düzenlenir

2.5.4 Çıkış Bağdaştırıcısı

Çıkış çifti, yansıtıcı iki ayna arasındaki lazer ışığının bir kısmının aktif ortamdan lazer ışın demeti olarak dışarıya çıkmasına müsaade eden kısımdır. Geri besleme mekanizmasındaki aynalardan biri ışığın bir kısmının lazer dalga boyunda aktif ortamdan dışarı iletilmesini sağlar. Lazer cihazına bağlı olarak çıkış çiftinin, dışarıya iletilmesine müsaade ettiği lazer demetinin miktarı değişmektedir. Çıkış çiftinin dışarıya çıkmasına müsaade ettiği ışının oranı bazı Helyum Neon lazerlerde % 1'den az, katı durum lazerlerinde ise % 80'den fazladır.

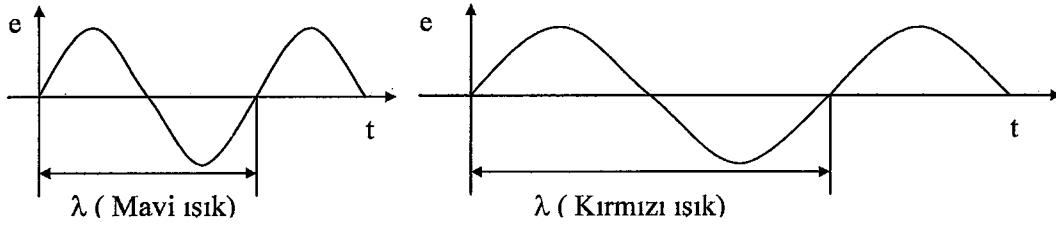
2.6 Lazer Işınının Karakteristikleri

Bilindiği gibi, lazerin bıraktığı ışık diğer ışık kaynaklarının yaydığı ışıktan farklıdır. Lazer ışığının önemli özellikleri;

- Tek renklilik (Monochromaticity),
- Uyumluluk (Coherence),
- Uzaklaştıkça Dağılma (Divergence),
- Yoğunluk (Intensity),
- Yönlendirilebilirlik (Directionality).

2.6.1 Tek Renklilik

Her bir ışığın kendine has bir dalga boyu (λ) vardır (Şekil 2.8). Işığın rengi bu dalgaların uzunluğu ile belirlenir. Dalganın kendisini tekrarladığı mesafeye dalga boyu denir ve λ ile gösterilir. Görünebilir her ışığın kendisine has bir dalga boyu vardır. Yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları farklı dalga boylarında ışınlar yayarlar



Şekil 2.8: Kırmızı ve mavi ışığın dalga boylarının mukayesesi

Lazer bile olsa gerçek manada tek renkli (*Monochromaticity*) ışık üretilemez. Bazı uygulamalarda, özel teknikler kullanılarak (prizma), lazer cihazından çıkan demetin tek renkliliği dar bir bant genişliğinde artırılabilir. Bu yüzden Helyum-Neon gaz lazerin yaydığı ışık demeti saf kırmızı renktedir.

2.6.2 Uyumluluk

Frekansı, fazı ve doğrultusu aynı olan iki dalga birbiriyle uyumlu (*Coherence*) olan dalgalar olarak tanımlanır. Uyumlu olan dalgaların her biri sinüzoidal olup, belli bir genliğe ve dalga boyuna sahiptirler. Lazer ortamından dışarıya çıkan dalgaların maksimum genliği ve dalga uzunluğu sabit kalmaktadır.

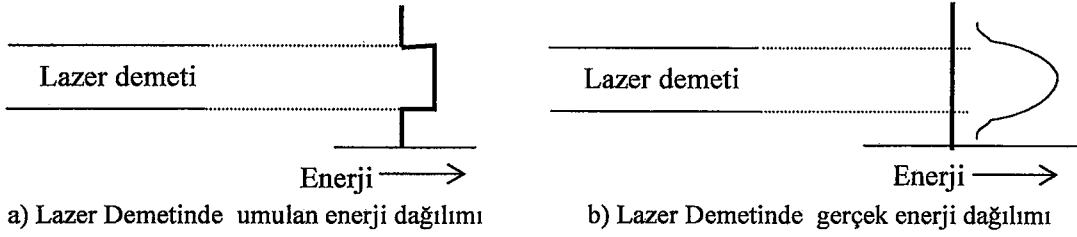
2.6.3 Uzaklaştıkça Dağılma

Lazerden çıkan ışık bir demet şeklindedir. Lazer ışığı başka ışıklar gibi çok geniş bir bölgeye yayılmaz. Çünkü lazer yalnız bir birine paralel olan demetler üretir. Fakat bu kesin bir paralellik değildir. Her zaman az da olsa bir eğilme vardır. Bu eğilmeye, *Difraksiyon* denir (Roessler, 1986).

Her bir ışık kaynağının ürettiği demet yayılmaya meyillidir, yani uzaklaştıkça dağılmaya tabi tutulmaktadır. Genellikle lazer demetinin yayılma açısı mili radyanlarla ölçülür. Gerçek bir lazer ışınındaki enerji dağılımı Şekil 2.9'da gösterildiği gibi 0.05° 'dir. Mesela, tipik bir He-Ne lazerin uzaklaştıkça dağılımı 0.5 ile 1.5 miliradyan arasında değişir.

Yukarıdaki açıklamalara dayanarak lazer ışınının Şekil 2.9(a)'da gösterilmiş biçimde olduğu düşünülebilir. Fakat gerçek Şekil 2.9(b)'de gösterildiği gibidir. Şekil

2.9(b)'de görüldüğü gibi, Enerjinin yoğunluğu merkezde en yüksek, kenarlara doğru gittikçe azalmaktadır. Bu şekildeki demet Gaussyen olarak tanımlanmaktadır. Lazer demeti mercekle kullanılarak bir leke şeklinde odaklandırılabilir. İç bükümlü mercekle kullanılarak demet çapı genişletilebilir, dış bükümlü mercekle kullanılarak da demet çapı daraltılabilir.



Şekil 2.9: Lazer ışın demetinin; a) Umulan, b) Gerçek, enerji dağılımları

Tipik bir lazer demeti uygulaması için uzaklaştıkça dağılma Formül 2.3'ten hesaplanabilir (Yariv 1985).

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi W_0}\right) \quad (\text{Lazerlerde } \left(\frac{\lambda}{\pi W_0}\right) \ll 1 \text{ dir. } \theta = \left(\frac{\lambda}{\pi W_0}\right) \text{ alınabilir.}) \quad (2.3)$$

Formülde θ : Demet Uzaklaşması (Radyan veya Derece), W_0 : Işın demetinin yarı çapıdır.

2.6.4 Yoğunluk

Lazer demeti çok yoğun olan bir ışık üretir. Lazerin ürettiği enerjinin küçük değerli olmasına rağmen, uyarılmış emisyonla üretilen ışıktaki bu güç yoğunlaşmış olur. Her bir atomun verdiği foton diğerinin verdiği fotonla senkronlaşmış olur. Uyumluluk ise elde edilen demet genliğinin çok yüksek olmasına sebep olur.

Lazer bütün enerjisini dar bir demette topladığı için, ışığı çok parlaktır. Karşılaştırmak için, güneş ışığının yoğunluğu yaklaşık olarak 130 W/cm^2 , bir He-Ne

lazerin ışık yoğunluğu ise 10^6 W/cm^2 dir. Bazı darbeli lazerler yoğunluğu 10^{18} W/cm^2 olan ışık üretebilirler (O'Shea 1978).

2.6.5 Yönlendirilebilirlik

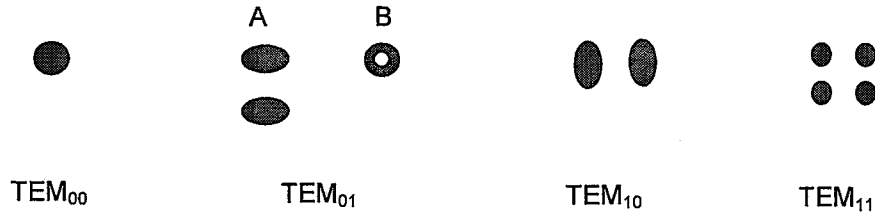
Işık kaynağı olarak günlük hayatta kullandığımız lambalardan her yönde ışık yayılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan ışık kaynakları bu şekilde ışık yaymaktadır. Yönlendirilebilirlik, lazer ışığının karakteristik özelliklerinden biri olup bir yönde dar bir hünide yayılımı söz konusudur. Işığın yönlendirilebilirliğinin oldukça paralel olması, ışığın bir araya leke şeklinde toplanabilmesini sağlamaktadır. Lazer ışınları oldukça uzun bir mesafeyi sabit genişlikte bir ışın demeti olarak alır, bu mesafeden sonra genişlemeye başlar. Genişliğin sabit kaldığı mesafe formül 2.4'den hesaplanabilir (Ready 2002).

$$D_m = \frac{d_0^2}{4\lambda} \quad (2.4)$$

Formülde; d_0 : Optik çukurdaki aynalar arası mesafedir.

2.7 Elektromanyetik Çaprazlaşma Modları

Lazer demetin elde edilmesinde lazer ışın demetinin çıkış şekli, fotonların dalga boyuna, aynaların eğrilğine, yerleştirilmesine, hizalandırılmasına ve lazer çukurunun çapına bağlıdır. Demet değişik bölgesel çaprazlaşmalar şeklinde olabilir ve buna da elektromanyetik çaprazlaşma modları (*Transverse Electromagnetic Modes, TEM*) denir. Bir çok genel *TEM Gaussian* biçimindedir ve bu biçim *TEM₀₀* olarak tanımlanmaktadır. *TEM₀₀* biçimli demet, tek bir tayftan, *TEM₀₁* biçimli demet, bir dikey çizgide yerleşmiş veya iç içe girmiş olan iki tayftan, *TEM₁₀* biçimli demet, bir yatay çizgide yerleşmiş olan iki tayftan, *TEM₁₁* biçimli demet ise bir dörtgenin tepelerinde yerleşmiş olan dört tayftan oluşur. *TEM₀₁* biçimli demetin enerjisi kenarlarda yoğunlaşmış olur (Şekil 2.10).



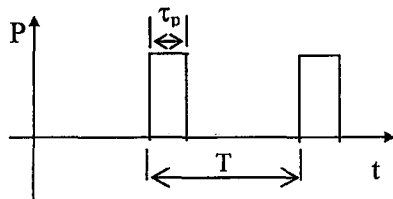
Şekil 2.10: Elektromanyetik Çaprazlaşma Modları

2.8 Güç Ve Enerji

Demeti oluşturan ışık tayfının yoğunluğunu değerlendirebilmek için *enerji* kavramı kullanılmaktadır. Lazer alanında enerji *Joule* ile ölçülür. Bir Watt gücün bir saniyede ürettiği enerji bir Joule'dur.

Işık tayfını sürekli olarak üreten lazerlere sürekli dalga modunda çalışan lazerler, ışık tayfını periyodik darbeler şeklinde üreten lazerlere ise tekrarlanan darbeler modunda çalışan (*Pulse Repetition Rate Mode- PRRM*) lazerler denir. Tekrarlanan darbeler modunda çalışan lazerlere kısaca darbeli lazerler denir. Bazı lazerler normalde yalnız Darbeli mod'da çalışabilirler (mesela, Nd:Cam ve Yakut lazerler).

CW lazerlerde ölçülen güç ortalama güçtür. Darbeli lazerlerde ise güç, ortalama güç ve tepe gücü olarak iki şekilde ölçülebilir (Şekil 2.11):



Şekil 2.11: Lazer güç darbeleri

Ortalama güç bir T periyodunda, tepe gücü ise darbenin τ_s süresince ölçülür. Ortalama ve tepe güç formülleri 2.5'te verilmiştir.

$$P_{avg} = \frac{E_p}{T} \quad P_{pk} = \frac{E_p}{\tau_p} \quad (2.5)$$

Formüllerde: P_{avg} : Ortalama güç, P_{pk} : Darbe gücü, E_p : Darbe enerjisi, T : Darbe periyodu, τ_p : Darbe süresidir. Ortalama gücün belirlenmesinin diğer bir yolu D_c doluluk oranının (*Duty cycle*) kullanılmasıdır (Formül 2.6).

$$D_c = \frac{\tau_p}{T} \quad P_{avg} = D_c P_{pk} \quad (2.6)$$

2.5 ve 2.6 formüllerinden istenilen iki parametrenin değerleri belli ise üçüncü parametre değeri bulunabilir. Örneğin: PRR=1 kHz, $E=100$ mJ, $\tau_p=1$ μ s için tepe ve ortalama güç değerlerinin hesaplanması;

$$P_{pk} = \frac{E_p}{\tau_p} = \frac{100 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 100 \times 10^3 = 100kW$$

$$P_{avg} = \frac{E_p}{T} = \frac{100 \times 10^{-3}}{0.001} = 100W$$

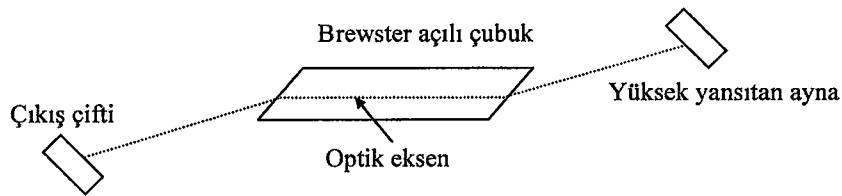
$$D_c = \frac{\tau_p}{T} = \frac{10^{-6}}{10^{-3}} = 0.001; \text{ veya}$$

$$P_{pk} = \frac{E_p}{\tau_p} = \frac{100 \times 10^{-3}}{10^{-6}} = 100kW ; \quad P_{avg} = D_c P_{pk} = 10^{-3} \times 10^5 = 100W$$

3. KATI HAL LAZERLERİN ESAS ELEMANLARI VE KAREKTERİSTİKLERİ

3.1 Katı Hal Lazer Çubuk Malzemelerin Özellikleri

Katı hal lazerlerindeki aktif ortam, lazer dalga boyunu geçiren ve lazer ışınının çıkmasını sağlayan az miktarda iyon içeren silindirik bir çubuktan oluşur. Lazer ışımalarının geri yansımalarını önlemek için, basit lazer sistemlerinin çoğunda lazer çubuğun her iki tarafında, parlatılmış düz bir yüzey bulunur ve optik eksen lazer çubuğun merkezi boyunca uzanır. Fakat, geri yansımaları önleme şekli her zaman bir kaplama malzemesi ile gerçekleştirilmeyebilir. Yüzey kaplaması yapmadan, lazer çubukta meydana gelebilecek çıkış, yüzeylerindeki iç yansımaları önlemek için lazer çubuğun uçlarından biri veya her ikisi, *Brewster* açılı yüzeyle değiştirilebilir. $n_1 = 1$ olan hava ile kırılma indisi $n_2 = 1.5$ olan cam arasındaki $\tan^{-1}(1.5/1) = 56.3^\circ$ Brewster açısı vardır. Lazer çubuk cam yüzeyinin 56.3° eğik kesilmesi durumunda oluşabilecek iç yansımalar önlenir (Schoenbeck 1998). Brewster açılı uçlarda daima çıkış demeti düzlem polarizeli ve Brewster yüzey açısına dik olur. Brewster açılı çubuğun uçlarındaki optik eksen, optik çukur içinde Şekil 3.1’de gösterildiği gibi olur. Lazer çubuğa yansımaların yerleştirilmesi ve ayna ayarlarının yapılması çok daha zor olduğu için, Brewster açılı lazer çubuk yerine düzlem paralel çubuk yaygın olarak kullanılır.



Şekil 3.1: Brewster açısında kesilmiş çubuğun çukur içinde optik ekseni

Katı hal lazer malzemelerde pompalama işlemi, en az bir flaş lambası kullanılarak optik olarak gerçekleştirilir. Katı hal lazer çubuktan alınabilecek enerji miktarı lazer çubuğun hacmine bağlıdır. Lazer çubuğun hacmi arttıkça çubuktan alınabilecek enerji miktarı da artar. Katı hal lazer çubuk değişik tipteki kristal ve

camlardan, aktif katkı maddesi olarak farklı iyonlar içeren malzemelerden yapılması denenmiştir. Yaygın olarak kullanılan katı hal lazer çubuklar aşağıda gösterildiği gibi sınıflandırılabilir.

- Yakut (*Ruby*),
- Camdan Neodimyum (*Nd:Glass*),
- Yttrium Alüminyum Garnette Neodimyum (*Nd:YAG*).

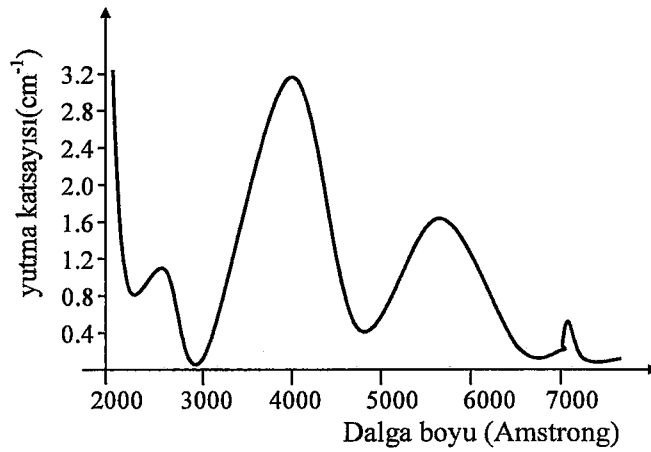
3.1.1 Yakut Lazer Çubuk

Yakut (*Ruby*) krom katkılı bir safirdir (Parlak mavi rengi geçiren değerli bir taş). Safir su beyazı rengindedir. Kristal bileşiği alüminyum ve oksijen atomlarını ihtiva eder (Al_2O_3).

Yakut lazer çubuğun kimyasal formülü $Al_2O_3: Cr^{+++}$ bu şekildedir. “ Cr^{+++} ” gösterimi, kristal içerisinde üçlü iyonize olmuş durumda krom atomları olduğunu gösterir. Suni yakutlar genellikle % 0,5 krom oksit ile katkılanmış ve oldukça koyu kırmızı bir materyal şeklindedir. Lazer kristal olarak krom katkılı kırmızı yakutlar oldukça pahalıdır. Denemeler lazer operasyonu için % 0,03 ile % 0,05 krom oksit katkılı pembe renkli yakutun en uygun malzeme olduğunu göstermiştir. Yakut kristalin fiziksel özelliklerinden bazıları şunlardır.

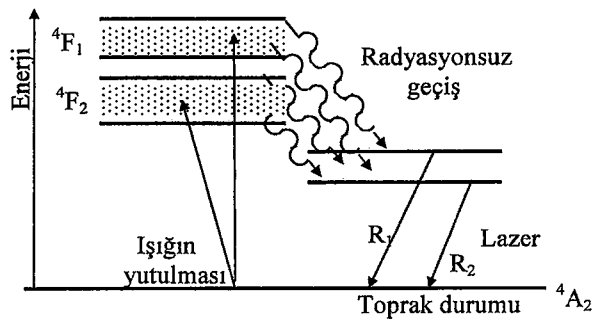
- Suda ve normal çözücülerde çözünmez,
- Çok yüksek bir erime noktasına sahiptir (2040 °C),
- Çok serttir (Hemen hemen elmas kadar),
- Çelikle gerilme uzaması ve özgül ısısı karşılaştırılabilir. Fakat ısı genleşmesi çeliğin 1/3’ü kadardır,
- 40 °C’deki ısı iletkenliği camdan 3 kat daha büyüktür.

Kırmızı (veya pembe) renkli yakut krom atomlarıyla katkılандırıldığında ışığı yutar. Yakutun basitleştirilmiş yutma tayfı Şekil 3.2’de gösterilmiştir (Maiman 1960).



Şekil 3.2: Yakutun yutma tayfı(LEOT Modül 3.3)

Yakut optik olarak pompalandığında 400 ve 550 nm merkezli dalga boylarındaki ışınları çok fazla yutar. Bu sebepten yakut için en uygun ışık rengi görülebilir tayfta olan mavi ve yeşil renklerdir. Şekil 3.3'te yakut kristalinin enerji seviye diyagramı gösterilmiştir. Yakut Şekil 3.3'te gösterildiğinden çok daha fazla enerji seviyesine sahiptir. Şekil 3.3'te yalnızca lazer olayı için önemli olan enerji seviyeleri gösterilmiştir. 4A_2 seviyesi yakutun toprak seviyesidir. 4F_1 ve 4F_2 yakutun iki önemli yutma tayf enerji seviyeleridir.

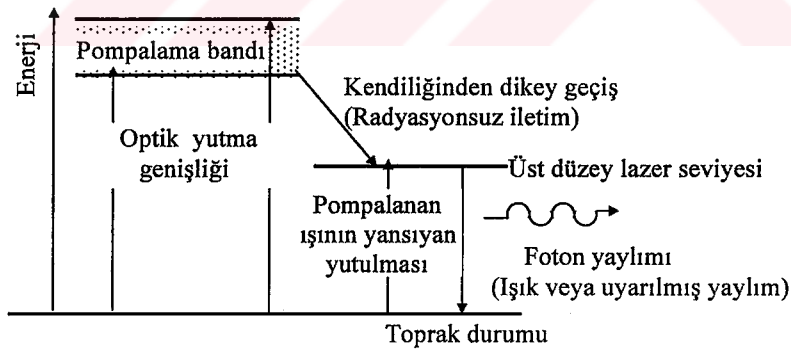


Şekil 3.3: Yakut lazerin enerji seviyeleri

Krom atomları uyarılmış seviyede yalnızca 10^{-8} s kalmaktadırlar. R_1 ile gösterilen geçişte 694,3 nm dalga boyunda R_2 ile gösterilen geçişte ise 692,7 nm dalga

boyunda lazer olayı meydana gelir. Fakat R_2 ile gösterilen geçişte lazer çıkışı normal dağılımında güçlü değildir. Üst düzey lazer durumunda bulunan bir atomun kendiliğinden emisyon yolu ile seviye değiştirmesi için ortalama bir ömrü vardır. Bu süre yakut kristali için 3 ms olup diğer lazerlerden fazladır.

Yakut'un lazer iletimi üç seviyeli sistem olarak tanımlanır. Şekil 3.4'te basitleştirilmiş üç seviyeli lazer için enerji diyagramı gösterilmiştir. Flaş lambasından çıkan optik enerjiyi yutan atom, toprak seviyesinden pompalama bandına geçer. Bu atom, hızlı bir şekilde elektron ömründen dolayı pompalama bandından lazer seviyesinin üst bandına düşer. Lazer üst seviyesinden de ilk bulunduğu toprak seviyesine geri düşer. Toprak seviyesi ile lazer seviyesinin üst bandı arasında nüfus terslemesi durumu mevcut olduğundan lazer olayı gözükür. Başlangıçta toprak seviyesinde bulunan atomların çoğu pompalandığı için toprak seviyesi boştur. Yakut kristal malzemede, nüfus terslemesi durumunu gerçekleştirmek için yüksek oranda pompalama enerjisine ihtiyaç vardır. Sürekli çalışma durumunu sağlamak için yakut çubuğa daha fazla enerji uygulanması gerekir. Bu sebepten yakut lazerler yalnızca darbeli modda çalışırlar.



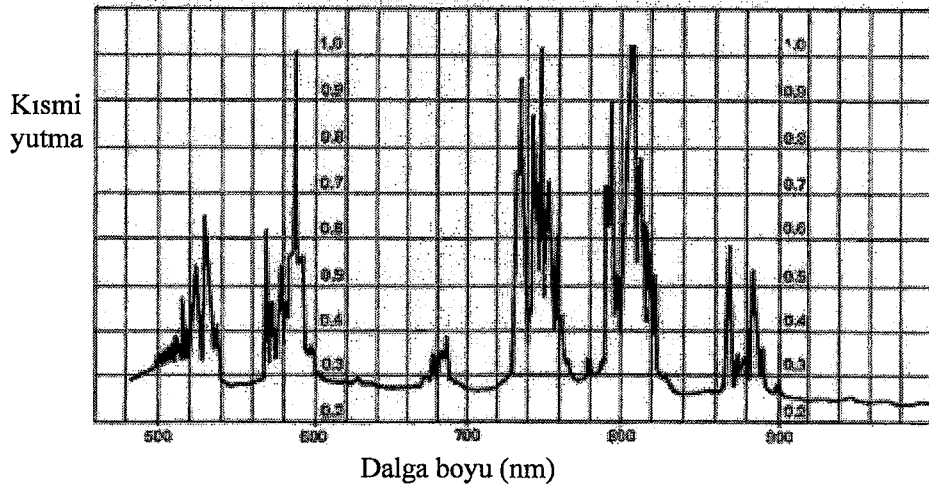
Şekil 3.4: Üç seviyeli lazerin basitleştirilmiş enerji seviyeleri diyagramı

3.1.2 Neodimyum :YAG Lazer Çubuk

Yaygın olarak kullanılan katı hal lazer malzeme % 5 neodimyum iyonları ile katkılanırılan, Yttrium alüminyum garnettir. YAG'ın kimyasal formülü $Y_3Al_5O_{12}$ dir. YAG'ın ısı iletkenliği caminkinden 10 kat fazladır. YAG yüksek bir erime noktasına sahip olup sert ve sağlam bir yapısı vardır. Saf YAG kristali görünürde safire benzer. Seyrek olarak neodimyum ilave edildiğinde lazer çubuğu olan YAG'ın rengi açık mora boyanmış gibi gözükür. Lazer kristal çubuğunun her iki ucu parlatılarak Nd:YAG'a ait dalga boyu olan 1,06 μm 'nin yansımına karşı kaplanmıştır.

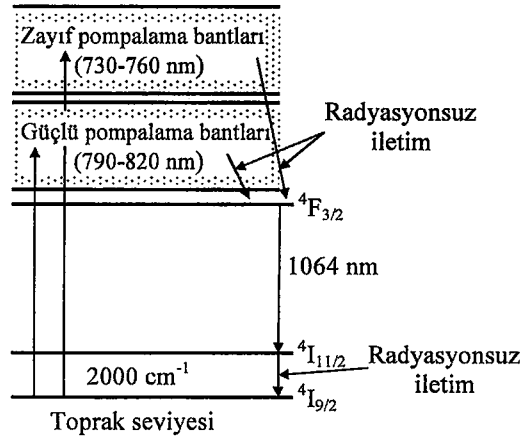
YAG kristali, Czochralski metodu ile neodimyum atomları emdirilerek Nd:YAG lazer çubuk elde edilir (Koechner 1992). Neodimyum doping seviyesi % 0.5 ila % 1 arasındadır. Kristal yapı içerisindeki neodimyum atomları aynı yakut lazer çubukta krom atomlarının olduğu gibi üçlü iyonize olmuş durumdadır. Şekil 3.5'te Nd:YAG lazer çubuğun yutma tayfı verilmiştir. YAG'ın yutma çizgileri keskin piklerden ve birbirine yakın bantlardan oluşmaktadır. İki önemli pompalama bandı bölgesi 730-760 nm ve 790-820 nm dir. Nd:YAG lazer çubuğun 1064 nm dalga boyunda ışın üretmesi için 810 nm dalga boyuna sahip ışık ile pompalanması gerekir. Nd:YAG lazerlerin verimi ışık kaynağının yaydığı dalga boyuna bağlı olarak değişir. Işık kaynağından çıkan 810 nm dalga boyuna sahip fotonların miktarı artıkça lazerin verimi de artar. Lazer çubuğun yutma bantları kızıl ötesi bölgeye yakın olduğu için bu durum çubuğun optik olarak pompalaması için çok uygundur. Optik enerjinin kısa dalga boyları, lazer çubuk tarafından yutulur. Fakat verimsiz olacak kadar mor ötesi bölgesinde ışık uygulanacak olursa, artan yutma miktarından dolayı çubuk aşırı ısınacak ve bu durum da lazer verimin düşmesine sebep olacaktır.

Nd:YAG lazerden 350-550 W arasında çıkış gücü elde etmek için, 10 kW'lık elektriksel pompalama gücüne sahip olan lambalar kullanılması gerekir. Büyük güçler elde etmek için Nd:YAG çubuğun optik pompalanmasında kullanılan Kr veya Xe lambalardan çıkan ışının büyük bir kısmı lazer çubukta % 97'si ısıya dönüşür (Kechner 1992).



Şekil 3.5: Nd :YAG lazer çubuğun yutma tayfı(Kentek Cor.)

Nd :YAG dört seviyeli lazerdir ve Şekil 3.6'da dört seviyeli lazerin basitleştirilmiş enerji seviye diyagramı gösterilmiştir. Fotonları yutan neodimyum atomlarının enerjisi artacak ve pompalama bantlarından birine yükselecektir. Pompalama bandına çıkan bir elektronun burada kalma süresi 10^{-8} s'dir. Bu süre zarfında atom hızlı bir şekilde herhangi bir ışıma yapmadan üst lazer seviyesine düşecektir. Üst lazer seviyesindeki ($^4F_{3/2}$) flüoresan ömrü 0.3 ms sürer (Koechner 1992).



Şekil 3.6: Nd:YAG lazerin enerji seviyeleri

Nüfus terslemesinin oluşması ile lazer oluşur ve atom alt lazer seviyesine düşer. Alt lazer ($^4I_{11/2}$) seviyesi toprak seviyesine ($^4I_{9/2}$) çok yakındır ve uyarılmış atomlar hızlı bir şekilde bir ışıma yapmaksızın toprak seviyesine geri dönerler. Işıma yapmadan iletilen atomlar, ısı enerjisi yayarlar. Açığa çıkan ısı enerjisi, optik çukur ve lazer çubuk tarafından soğurulur. Eğer lazer çubuğun ısısı çok yükselecek olursa ısının etkisi ile atomlar, alt düzey lazer seviyesi ile toprak seviyesi arasında nüfus terslemesine sebep olacaktır. Bu durum lazerin meydana gelebilmesi için gereken sıralamayı bozacak ve lazer ışımalarının oluşmasını önleyecektir.

Bu sebepten dolayı Nd:YAG lazer çubuğunun sıcaklığını belirli bir derecede (40°C) tutmak çok önemlidir. Devamlı olarak açığa ısı enerjisinin lazer çubuktan uzaklaştırılması gerekir. Isının Nd:YAG kristalden uzaklaştırılması için soğutma sistemi kullanılır. Çubuğun ısı iletkenliği çok iyi olduğu için soğutma sisteminin veriminin yüksek olması için, soğutucu sıvı olarak saf su kullanılır. Lazer çubuğunun soğutulma işlemi doğrudan üzerinden sıvı akıtılarak yapılır. Lazer çubuğun kaplama malzemesinin soğutma suyunun içinde çözülmesini önlemek için çubuk kuvars veya koruyucu cam kılıfın içine yerleştirilmiştir. Lazer çubuk elamanı optik çukur içerisinde özel sızdırmazlık elemanları ile montaj edilerek sıvı sızması ve böylece flaş lambasının zarar görmesi önlenir.

Nd:YAG lazerler çubuk soğutularak sürekli modda çalıştırılabilirler. Sürekli modda çalıştırılabilen katı hal lazer cihazlarında Nd:YAG lazer çubuk yaygın olarak kullanılmaktadır. Nd:YAG lazer çubuğun darbeli modda çalışmasındaki verimi, Yakut lazer çubuğunkinden fazladır. Sürekli dalga modunda çalıştırılacak lazer çubuğun çapı 1 ilâ 3 cm arasında, uzunluğu ise 10 ilâ 50 cm arasında olur. Soğutma işleminin kolay olması için mümkün olduğunca küçük çaplı olanları seçilir.

3.1.3 Neodimyum : Cam Lazer Çubuk

Neodimyum atomları Nd:Cam lazer çubuk için de aktif element olarak kullanılır. Katkı seviyesi genellikle % 1'den azdır. Nd:Cam'ın yutma tayfı ve enerji seviyeleri

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
RÖKÜ MANTASYON MERKEZİ

Nd:YAG'a benzer, fakat camın yutma pikleri sınırlı ve dar bölgelidir. Bu sebepten dolayı, YAG yapımında cam bulunmaz. Camın düzgün olmayan rasgele yapısından dolayı pompalama esnasında çubukta oluşacak ısının uzaklaştırılması için özel soğutucu sıvıları gerekir. Neodimyum iyonları YAG kristalinde komşuları ile aynı boşluktadır ve benzer çevrelerdedirler. Camın rasgele yapısından dolayı her bir iyon farklı bir çevreye sahiptir. Bunlar sonuçta farklı yayılmış iyonların farklı enerji seviyelerinde bulunmasına yutma ve tayf çizgilerinin de farklı olmasına sebep olur. Sonuçta da üst lazer seviyesi için ömrün artmasına neden olur. Darbe modunda Nd:Cam'ın veriminin Nd:YAG lazerden fazla olmasının nedeni söz konusu durumdur.

Nd:Cam materyelin ısı özellikleri diğer katı hal lazerlerinden düşüktür (Payne 1995). Bu da, atık ısının lazer materyal ortamında uzun süre kalmasına ve dolayısıyla sıcaklığın yükselmesine sebep olur. Bu durum Nd:Cam çubukta bulunan neodimyum atomlarının alt lazer seviyesinden toprak seviyesine geçişi çubuğun optik olarak pompalanması esnasında ortaya çıkan ısı miktarı arttıkça yavaşlar. Lazerin meydana gelmesi için gereken sıralamanın hızlı bir şekilde tekrarlanması gerekir. Bu sıralama bozulduğundan lazer olayı için istenen ışıma ortaya çıkmayacaktır. Nd:Cam çubuğun sahip olduğu söz konusu özelliğinden dolayı bu çubuğun kullanıldığı lazer cihazları yalnızca darbeli modda çalışırlar (Dumanchin 1971).

3.2 Katı Hal Lazer Çubukların Optik Olarak Pompalanması

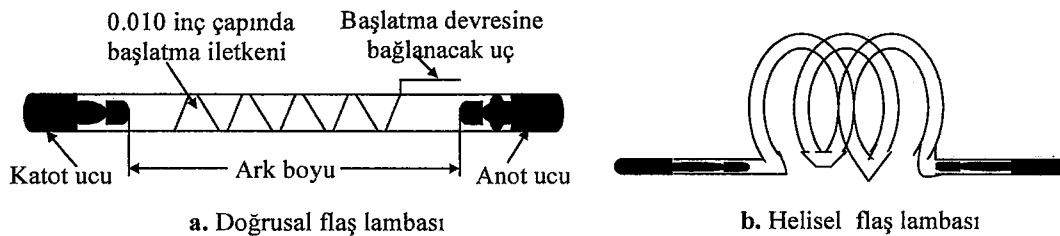
Katı hal lazerlerinde uyarma işlemi lazer çubuğun ışığı yutması ile sağlanır. Işık lazer çubuğa yakın olarak yerleştirilen bir pompalama lambasından elde edilir. Verimli bir şekilde optik olarak pompalama için lazer çubuğun yutma tayfı ile pompalama lambasının çıkış tayfı birbirine uygun olmalıdır ve her iki elemanın da bir optik çukur içine uygun bir şekilde yerleştirilmesi gerekir (Weast 1971). Lambadan yayılan ışığın tamamı lazer çubuk tarafından yutulmaz. Çubuk tarafından yutulmayan ışık, optik çukurda ısı enerjisine dönüşür. Katı hal lazerleri pompalamada yaygın olarak aşağıdaki elemanlar kullanılır (Weast 1971).

- Flaş lambası,
- Ark lambası,
- Akkor filamanlı lamba,
- Lazer diyot.

3.2.1 Flaş Lambası

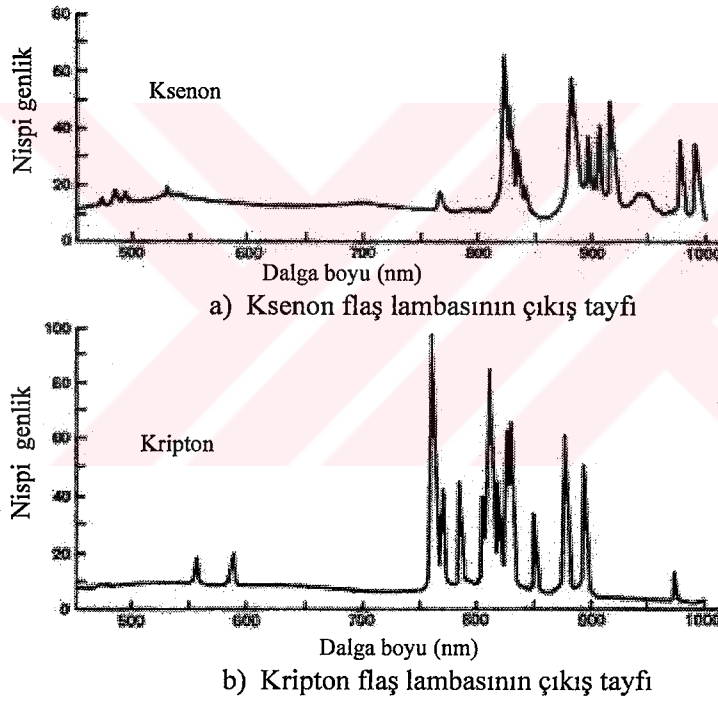
Darbeli Nd:YAG lazerlerde Kr ve Xe gazı ile doldurulmuş 810 nm dalga boyunda ışık yayan flaş lambaları kullanılır (Sam's, <http://repairfag.org>). Doğrusal flaş lambası Şekil 3.7(a)'da gösterilmiştir. Flaş lambalarında elektrotlar arasındaki mesafe “ark uzunluğu” olarak tanımlanır ve bu mesafe, yaklaşık olarak lazer çubuğun boyunda olacak şekilde seçilir. Flaş lambasının kuvars tüpünün iç çapı, lazer çubuğun çapı ile genellikle aynıdır. Lazer çubuk boyutları seçilirken optik flaş lambasının iç kısmının boyutları aynı olacak şekilde olmasına dikkat edilir (Oliver 1971). Lamba ve lazer çubuk yansıtıcı bir optik çukur içerisine eksenleri paralel olacak şekilde yerleştirilir.

Şekil 3.7(b)'de gösterilen flaş lambaları da darbeli tip lazerleri pompalamada kullanılabilir (Sirohi 1984). Helisel flaş lambasından en iyi şekilde pompalama elde etmek için helisel kısmının kesiti mümkün olduğunca küçük ve yan yana helisellerin bitişik olması gerekir. Optik pompalama gerçekleştirilirken helisel lambanın içerisine lazer çubuk, lambanın dışına da silindirik yansıtıcı yerleştirilir (Koechner 1992).



Şekil 3.7: Katı hal lazerleri için örnek flaş lambaları

Şekil 3.8’de iki tip flaş lambanın ürettiği ışık tayfı gösterilmiştir. Kripton flaş lambasının ürettiği ışınların çoğu Nd:YAG ve Nd:Cam’ın soğurduğu kızıl ötesi bölgede olduğu için Kripton flaş lambası, Nd:YAG ve Nd:Cam lazer çubuklar için en iyi tayf eşleştirmesine sahiptir (Noble 1971). Kripton flaş lambaları pahalı oldukları için yaygın olarak kullanılmazlar. Ksenon flaş lambaları da Nd:YAG lazer çubuk için gereken tayf eşleştirmesine (810 nm) sahiptir (Sirohi 1984). Nd:YAG çubuk için, Ksenon lambanın akım yoğunluğu azaltılarak, çıkış tayfının verimli olduğu kırmızı bölgeye kaydırılır.



Şekil 3.8: Darbeli katı-hal lazerde kullanılan flaş lambanın çıkış tayfı(LEOT Modül 3.3)

Yakut lazer çubuğun soğurabileceği bölgedeki ışık tayfını en verimli şekilde Ksenon flaş lambası üretir. Bu sebepten, yakut lazer çubuğu optik olarak pompalamak

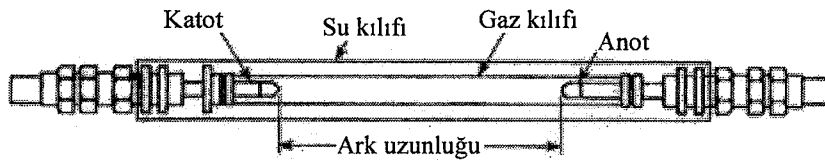
için Ksenon flaş lambası kullanılır. Ksenon flaş lambalarının verimi düşüktür fakat kabul edilebilir sınırlar arasındadır.

Ksenon flaş lambaları, yakut lazerin soğurduğu mavi-yeşil bölgede güçlü yayılıma sahip oldukları için bütün yakut lazerlerin pompalanmasında Ksenon flaş lambası kullanılır. Lambanın akım yoğunluğu arttıkça alternatif yayılımının da artışı söz konusudur. Bu durum kısa süreli yüksek darbe akımları ile lambanın sürülmesini gerektirir. Kısa optik pompalama darbeleri ile ışık tayfı ileriye doğru, mavi bölgeye kaydırılabilir (Holzrichter 1969).

Flaş lambalarının ömrü 5.000.000 ila 200.000.000 darbe arasındadır. Lamba ömrünün bittiği soğutma sıvısına transfer edilen ısı miktarının artması ve lazer çıkış gücünün azalmasından anlaşılabılır (Holzrichter 1974, Koechner 1988).

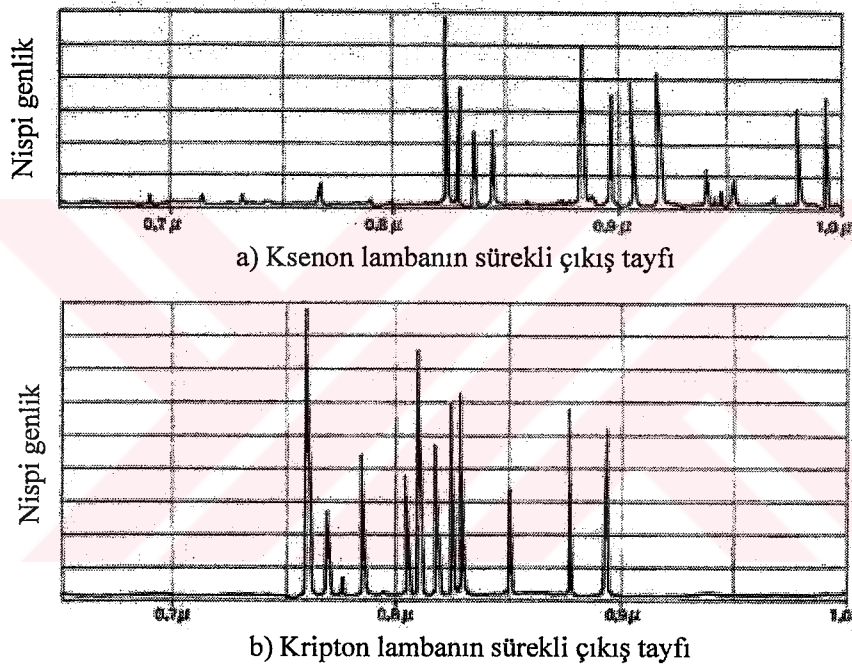
3.2.2 Ark Lambası

Sürekli dalga Nd:YAG lazerler için, Kr ve Xe gazı ile doldurulmuş ark lambaları kullanılır. Nd:YAG lazer çubuğu, sürekli olarak pompalamada kullanılan ark lambası Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Lambanın 1 ½ mm kalınlığındaki kuvars tüpü içinde yüksek basınçlı bir soy gaz vardır (Noble 1972). Tüpün kapalı olan her iki tarafına birer metal elektrot yerleştirilmiştir. Ark mesafesi zarf kılıfın kısa ya da uzun olması ile kontrol edilebilir. Sürekli mod lazerlerde ısınan elektrotlar ve kuvars kılıf su ile soğutulur.



Şekil 3.9: Su soğutmalı gazlı ark lambasının yapısı

Genellikle lamba yapımında soy gaz olarak 2-4 atmosfer basıncında Kripton veya Ksenon gazı kullanılır. Şekil 3.10'da Kripton ve Ksenon ark lambalarının çıkış tayfları gösterilmiştir. Nd:YAG lazer çubuğun yutma tayfına (Şekil 3.5) Ksenon lambasından ziyade, Kripton ark lambasının çok daha uygun olduğu görülür. Söz konusu sebepten sürekli dalga modunda Nd:YAG lazer çubuğu optik olarak pompalamak için Kripton ark lambası kullanılır.



Şekil 3.10: Sürekli çalışan ark lambaların çıkış tayf (LEOT Modül 3.3)

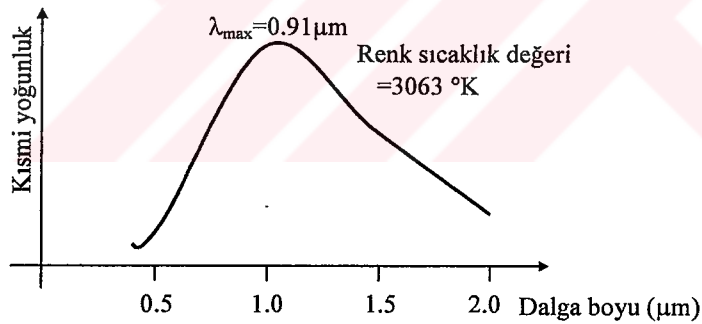
Ark lambalarının veriminde lamba empedansının değeri oldukça önemlidir. Ark lambalarının ömrü 400 ila 1500 saat arasındadır. Lamba ömrünün bittiği, soğutma sıvısına transfer edilen ısı miktarının artması ve lazer çıkış gücünün azalmasından anlaşılabilir (Koechner 1988).

Kripton ve Ksenon lambanın üzerinde oluşan ısıdan dolayı bozulmasını önlemek için, soğutulması gerekir. Ksenon lambaların kullanıldığı sistemlerde soğutma işlemi

lambanın uç kısımlarından gerçekleştirilir. Kripton ark lambaların kullanıldığı sistemlerde ise, lamba kapalı bir su kanalı içerisine yerleştirilir ve kanal içinden su akıtılarak soğutma işlemi gerçekleştirilir.

3.2.3 Akkor Filamanlı Lambalar

Nd:YAG lazerleri pompalamada kullanılan en ucuz ışık kaynağı tungsten filamanlı lambadır. Bu lambalar, genellikle tungsten iletkenin sarılmasından dolayı, koruyucu olarak bir kuvars kılıf içerisine alınırlar. Şekil 3.11'de GE tipi DXW 1000 W tungsten filamanlı lambanın çıkış tayfı gösterilmiştir (Koechner 1988). Nd:YAG lazer çubuğun optik olarak pompalanması için akkor lambasının çıkış tayfı eşleşmektedir. Tungsten filamanlı lambalar AC veya DC olarak çalıştırılabilirler. Tungsten Filamanlı Nd:YAG lazer cihazının verimi, % 1'den az olduğu bildirilmiştir (Church 1967).



3.2.4 Lazer Diyotlar

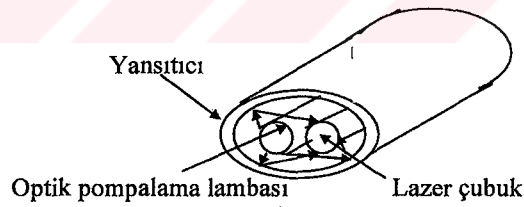
Nd:Yag lazerlerin verimini artırmak için Nd:YAG çubukların optik pompalamasında 808 nm dalga boyunda ışın demeti üreten lazer diyotlar kullanılır.

Nd:YAG lazerden 2-20 W arasında çıkış gücü elde etmek için 10-50 W arasında çıkış gücüne sahip lazer diyet ile pompalamak gerekir.

Lazer diyet kullanılan Nd:YAG lazerin verimi % 25 ila % 50 arasında değişmektedir (Zayhowski 1989, Frauchiger 1989). Nd:YAG lazerleri pompalamak için kullanılan lazer diyetlerin sıcaklığı çok iyi bir şekilde kararlı olarak sabit tutulmalıdır. Lazer diyetlerin sıcaklığının artması ile verdikleri ışının dalga boyu da $3 \text{ A}^\circ/\text{C}$ ($808 \text{ nm} \cong 20 \text{ A}^\circ$) artmaktadır.

3.3 Optik Pompalamada Kullanılan Çukur Şekilleri

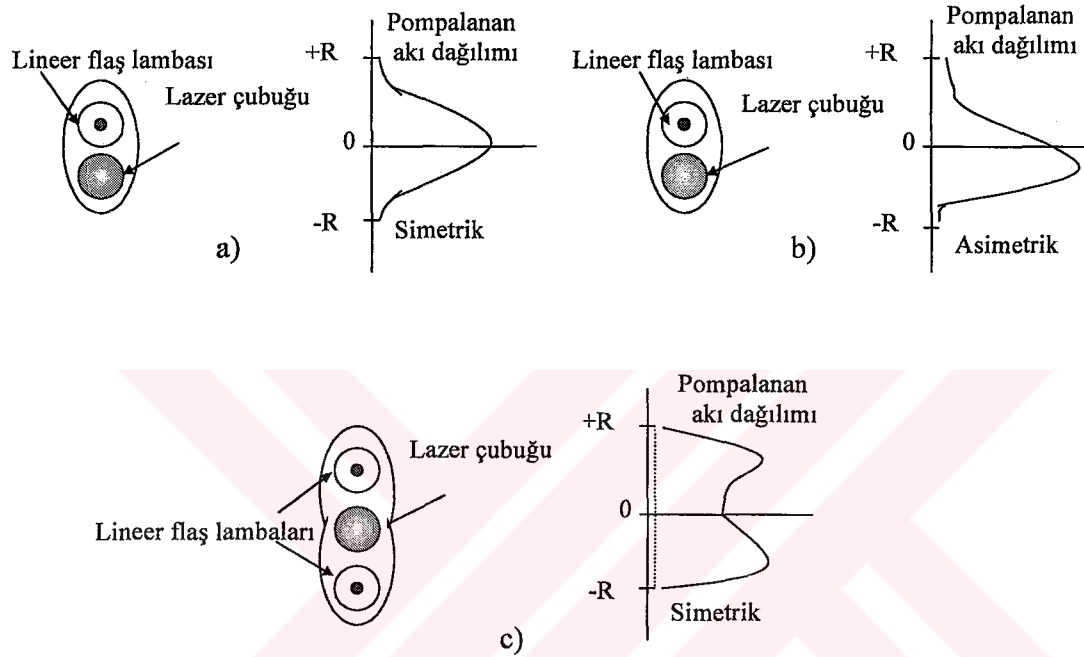
Elips yüzey şekilli silindir yansıtıcının odak noktalarına lamba ve lazer çubuğun merkezleri gelecek şekilde yerleştirilir (Şekil 3.12). Flaş lambasından çıkan ışınların büyük bir kısmı yansıtıcı yüzeye çarparak yansıtıcının diğer merkezine yerleştirilen lazer çubuğun merkezinden geçerler. Pompalama verimini artırmak için lazer çubuk ile pompalama lambası mümkün olduğunca birbirine yakın yerleştirilmelidir.



Şekil 3.12: Oval yansıtıcılı pompalama şekli

Optik pompalamayı sağlamak için helisel pompalama lambası kullanıldığında lambayı içine alacak şekilde yansıtıcı çukur kullanılır. Lazer çubuk helisel lambanın merkezine gelecek şekilde yerleştirilir. Şekil 3.13(a)'da tek bir oval çukurlu zayıf yutan çubuğun radyal kazanç profili, Şekil 3.13(b)'de tek bir oval çukurlu güçlü yutan çubuğun radyal kazanç profili, Şekil 3.13(c)'de ise, çift oval çukurlu güçlü yutan

çubuğun radyal kazanç profili verilmiştir (Silfvast 1999). Uygulamada yaygın olarak kullanılan optik çukurlar Şekil 3.13'te gösterilen tek elipsli tek lambalı ve çift elipsli iki lambalı yansıtıcılardır.



Şekil 3.13: Tek bir oval çukurlu;

- a) zayıf yutan çubuğun radyal kazanç profili
- b) güçlü yutan çubuğun radyal kazanç profili
- c) Çift oval çukurlu güçlü yutan çubuğun radyal kazanç profili

3.4 Katı Hal Lazer Cihazları

Katı hal lazer cihazları, lazer elde etmede kullanılan çubuğun tipi ile adlandırılırlar. Yaygın olarak kullanılan Katı hal lazer cihazlarını aşağıda verilen şekilde üç sınıfta toplamak mümkündür.

- Yakut lazer cihazları,
- Nd: Cam lazer cihazları,
- Nd:YAG lazer cihazları.

3.4.1 Yakut Lazer Cihazları

Yakut lazer cihazlar ilk olarak ortaya çıkan ve endüstriyel uygulamaları yapılan katı hal lazerleridir. Yakut lazer çubuklar $\frac{1}{4}$ inç çapında 3 inç uzunluğunda veya $\frac{1}{2}$ inç çapında 6 inç uzunluğunda olmak üzere çeşitli ebatlarda yapılırlar. Bazı büyük güçlü yakut lazer sistemlerinde 1 inç çapında 15 inç uzunluğunda çubuklar kullanılır. Tipik bir küçük güçlü yakut lazer sisteminde kullanılan lazer çubuğun çapı $\frac{1}{4}$ ila $\frac{1}{2}$ inç aralığında uzunluğu ise, 3-4 inç kadardır. Yakut lazerin darbe enerjisi 150 J'a varabildiği halde, uygulamada gücü birkaç on J olan lazerler kullanılır. Bu lazerin her bir darbesi birkaç mili saniye sürebilir. Yakut lazerlerde Q anahtarlama kullanılarak her bir darbenin sürekliliği birkaç nano saniyeye kadar düşürülüp darbe gücü 10 megawat'a kadar çıkartılabilir. Bu lazerler düşük gigawat (*low-gigawatt*) güçlü ve sürekliliği 10 piko saniye olan darbeler üreten kilitlenmiş-modda (*mode locked*) yapılabilirler.

Yakut lazerler Nd:YAG lazerler imal edilinceye kadar metal malzemelere delik delmede yaygın olarak kullanıldı. Nd:YAG'ın verimi ve daha yüksek hızda darbe tekrarlamaları gibi üstünlükleri ile yakut lazerlerin önüne geçmişlerdir. Yakut lazerler, günümüzde laboratuvar uygulamalarında, darbeli holografide, mesafe tayin sistemlerinde ve materyal işlemede kullanılmaktadır.

3.4.2 Nd:Cam Lazer Cihazları

Yüksek enerji darbeleri elde etmek için Nd:Cam lazerler ilk olarak kullanıldı. Nd: Cam lazer çubukların boyutları ise, üretim şekline göre değişebilir. Cam lazer çubuğun verimli bir şekilde soğutulması için çapı $\frac{1}{2}$ inç olan çubuklar yaygın olarak kullanılır. Cam çubuğun çapı en fazla 1 inç olabilir. Çubuk boyları ise 6 inçten 25 inç'e kadar olabilir. Nd:Cam lazer çubukların ana dezavantajı, camın ısı enerjisini iyi iletmemesidir. Bu sebepten lazer çubuğun soğutulması gerekir. Soğutma işlemi lazer çubuğun kenarlarından gerçekleştirilir.

Nd:Cam lazerler yapısal olarak yakut lazerlere çok benzerler. Yakut lazer cihazında bulunan aynalar ve lazer çubuk değiştirilerek Nd:Cam lazer cihazına çok kolayca dönüştürülebilir. Böylece elde edilen güç darbeleri, dört kat daha fazla olur.

Nd:Cam lazerlerden oldukça kısa süreli darbeler elde edilebilir. 1W gücünde Nd:Cam lazerden darbe süresi < 200 fsec olan darbe elde edilmiştir (Keller 1996).

3.4.3 Nd:YAG Lazer Cihazları

Nd:YAG, günümüze kadar kullanılan en popüler katı hal lazeridir. Soğutma işlemi hava zorlamalı veya sıvıdan havaya ışı alışverişi yapan kapalı bir soğutma sistemi ve fan ile yapılır. Hava zorlamalı soğutma sistemleri darbe başına sadece bir joule'lik yada daha düşük enerji seviyelerindeki kapasitelere sahip lazer cihazlarında kullanılır.

Darbe tekrarlama hızı tek vuruştan bazı sistemlerde 100 darbeye kadar değişir. Darbe süresi bir ayarlı darbe biçimlendirme devresi ile ayarlanabilir. Darbe süresi 0.5 ms'den 8 ms kadar değiştirilebilir. Bu özellikteki tipik bir lazerin gücü 100-400 Watt arasındadır.

Büyük güçlü (1 kW ve üzerindeki) darbeli Nd:YAG lazerler, materyal işleme uygulamalarında kullanılan en yaygın katı hal lazerleridir. Bu uygulamaların içine markalama, delik delme çizerek malzemeyi işaretleme ve lazer kaynak uygulamaları da dahildir.

Nd:YAG lazerin materyal işleme uygulamalarında tercih edilme sebebi, yüksek darbe tekrarlama hızına sahip olmasındandır. Darbeli Nd:YAG lazerlerin güç kaynakları sistemden maksimum ortalama gücü alabilecek şekilde tasarlanırlar. Düşük darbe tekrarlama hızında yüksek darbe enerjilerine sahiptirler. Yüksek darbe tekrarlama hızlarında aynı ortalama güç üretilebilir fakat darbe başına enerji daha düşüktür. Örneğin, bir sistem, saniyede 20 darbe üreterek darbe başına 20 Joule veya 200 darbe üreterek darbe başına 2 joule verebilir.

Yüksek darbe hızlı sistemlerde optik pompalama lambasının ömrünü uzatmak için lambalar çoğu zaman yanık tutulur. Lambalar ilk yakıldıklarında, en büyük bozulmaya maruz kalırlar. Yanık tutma veya yavaş yavaş yakma sistemlerinde lamba

devresinden yaklaşık 2 A'lık bir akım sürekli olarak akar. Böylece lambada deşarj sürekli tutulur ve her lazer darbesi için gerekli yüksek voltaj tetikleme darbesi istenmez ve lamba şokları da olmaz.

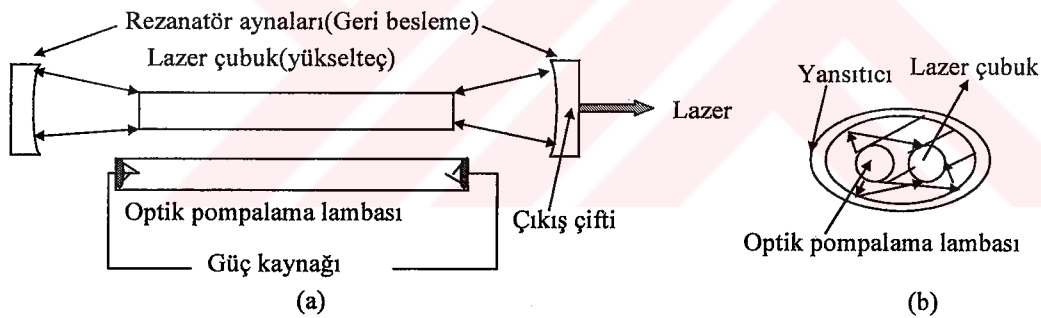
Nd:YAG lazer cihazları aşağıda belirtilen modlarda çalışabilirler.

- Sürekli dalga çalışma modu,
- Darbeli çalışma modu.

Lazer cihazları bu çalışma modlarından birinde veya ikisinde de çalışabilir.

3.4.3.1 Sürekli Dalga Nd:YAG Lazer Cihazı

Sürekli dalga Nd:YAG lazerler ile birkaç miliwattan oldukça yüksek kilowattlar mertebesinde güç değerlerini elde etmek mümkündür. Sürekli dalga Nd:YAG lazer cihazının temel elamanları Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14: a) Sürekli çalışma modu Nd:YAG lazerin temel tasarımı
b) Optik çukur şekli

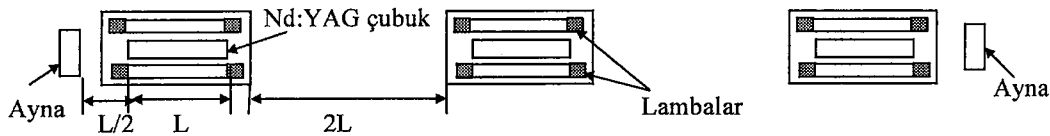
Lazer çubuğun dış kısmında oluşan ısı, soğutma sıvısı ile uzaklaştırılırken iç kısımlarında oluşan ısı çubuğun imal edildiği malzemenin düşük ısı iletme sahip olmasından dolayı uzaklaştırılamaz. Lazer çubukta ısının dağılımı flaş lambası geometrisine, çubuğun ışığı yutma katsayısına bağlı olarak değişmektedir (Lancaster 1998). Lazer çubuğun iç kısmında oluşan ısı artışından dolayı lazer çubuğun uç kısımları pozitif mercek gibi davranarak kısa odak uzaklığı oluşmasına sebep olur (Kogelnik

1965, Steinbruegge 1972, Lancaster 1998). Söz konusu durumdan yüksek güçlerde gaz lazerlerde olduğu gibi lazer çubuktan elde edilen lazer demetinin kalitesi zayıflar. Nd:YAG lazerlerin ortalama güç değerinin değişmesi ile demet kalitesi (M^2) de değişir. Uygulamada metal işlemede yaygın olarak kullanılan CO₂ ve Nd:YAG lazer cihazlarının demet kalitesi karşılaştırılması Çizelge 3.1’de verilmiştir (Koechner 1992).

Çizelge 3.1: CO₂ ve Nd:YAG lazer cihazlarının gücüne göre demet kalite değerleri

CO ₂ Power/ M^2			Nd:YAG M^2	
Çıkış Gücü(W)	CW	CW / Darbeli	Çıkış Gücü(W)	CW / Darbeli
<500	1.1-1.2	1.1-1.2	0-20	1.1 – 5
800 - 1000	1.2 – 2	1.7 – 2	20-50	20 – 50
1000 - 2500	1.2 – 3	2 – 3	50-150	50 – 75
5000	2 – 5	3 – 5	150-500	75 – 150
10.000	10	10	500-4000	75 – 150

600 W çıkış gücüne sahip bir lazerde lazer çubuk, eliptik optik çukur içerisinde bir veya iki adet flaş lambası ile pompalanır. Lazer çubuğun çapı 2- 10 mm, boyu ise 50-200 mm arasında olabilir. Genel olarak lazer çubuklar büyüdükçe çubuktan elde edilecek güç de artar. Elde edilen demet kalitesi düştüğü için 250 mm’den büyük lazer çubuklar imal edilmemektedir. Nd:YAG lazerden 600 W üstündeki güç değerlerini elde etmek için Periyodik rezonatör devresi kullanılır. Şekil 3.15’de gösterilen periyodik rezonatörlerden 4000 W kadar güç elde edilebilir (Ready 2002).

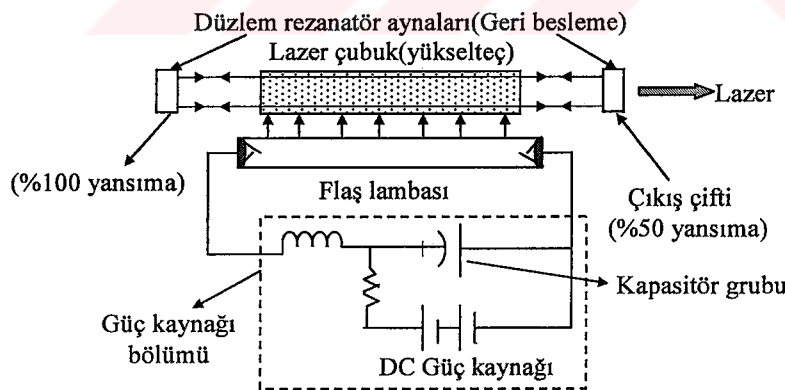


Şekil 3.15 : Üç lazer çubuklu periyodik rezonatör: aynalar çubuk ve rezonatör aralarındaki bulunması gereken mesafeler (L: Lazer çubuğun uzunluğu)

Nd:YAG lazerlerden yüksek tepe gücüne sahip ışın demetleri elde etmek için *acousto-optik (AO)* veya *elektro-optik (EO)* Q anahtarlama yöntemlerinden biri kullanılır. Nd:YAG lazerlerin ışını güvenlik sebebiyle robot kabini içerisinde kullanılır. Nd:YAG lazerler için üretilen robotlar ile ± 0.3 mm doğrulukla 2 m boyundaki parçaları işlemek mümkün olmaktadır. 2 kW gücündeki bir Nd:YAG lazer ile 6.7 m/dak. hızla 1-2 mm kalınlığındaki saç malzemelere 4 ila 30 mm çapındaki delikler delinebilmektedir (Ready 2002).

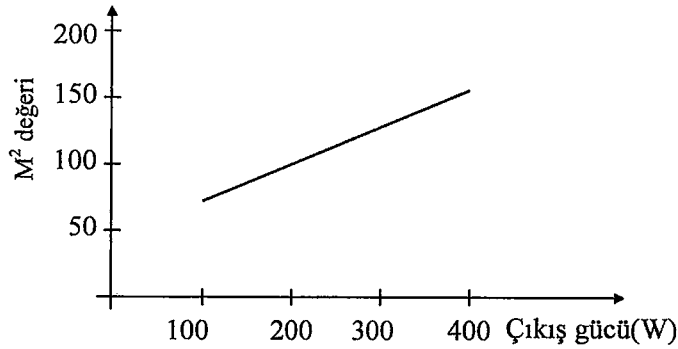
3.4.3.2 Darbeli Nd:YAG Lazer Cihazı

Darbeli Nd:YAG lazerde genellikle 3/8 inç çapında ve 6 inç uzunluğunda küçük güçlü olanlarda ise 1/4 inç çapında 5 inç uzunluğundaki çubuklar kullanılır. Darbeli katı hal lazerlerinde aktif ortam olarak katı hal çubuk kullanılır. Bu çubuk genellikle yakut, Nd:Cam veya Nd:YAG dır. Lazer çubuk optik olarak flaş lambası ile pompalanan bir optik çukur içerisine yerleştirilir. Flaş lambası güç kaynağından sağlanan darbeler ile çalıştırılır. Şekil 3.16'da darbeli lazer cihazlarının temel prensip yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.16: Darbeli katı hal lazerinin basitleştirilmiş şeması

Darbeli Nd:YAG lazer cihazlarının darbe gücüne göre demet kalitesinin değişimi Şekil 3.17’de gösterildiği gibidir (Ready 2002).



Şekil 3.17: Darbeli Nd:YAG lazerin çıkış gücüne bağlı olarak demet kalitesi(M^2) değişimi

3.5 Nd :YAG Lazer Cihazının Ek Donanım Birimleri

Uygulamada genellikle Nd:YAG lazerler ya sürekli modda, ya da darbeli modda çalıştırılırlar. Aktif ortam optik olarak sürekli pompalanırken Q anahtarlama optik çukur uygulaması da yaygın olarak kullanılır. Q anahtarlama ile lazer çubukta ani olarak nüfus terslemesi meydana getirilir. Q anahtarlama yansıtıcı aynalardan geri lazer çubuğa yansıyan ışınların bir engel ile geçici bir süre ile durdurulması işlemi gerçekleştirilir. Bu ışık engeli kısa bir süre kaldırıldığında çok güçlü lazer dalgaları elde edilir. Sürekli dalga Nd:YAG lazerlerde Q anahtarlama, yaygın olarak kullanılır. Sistem içine akusto optik malzemeler yerleştirilerek saniyede 50.000 darbe elde edilebilir. Sürekli dalga modunda pompalamalı Q anahtarlama Nd:YAG lazer saniyede 20000 darbe üretecek şekilde peş peşe çalıştırıldığında lazerin sürekli çıkış gücünün 500 katı gücüne sahip tepe darbe çıkış gücü oluşabilir. Lazerin darbe modundaki ortalama gücü sürekli çalışma modundaki çıkış gücünün % 90'ı kadar olabilir. Darbe süreleri genellikle 10 μ s'den azdır.

Sürekli dalga Nd:YAG lazerlerin lazer çukur içerisine frekans çiftleyici kristal yerleştirilerek (SHG) de çalıştırılması mümkündür. Nd:YAG lazerlerde en yaygın olarak kullanılan frekans çiftleyici kristaller sodyum niobate ($Ba_2NaNb_5O_{15}$) ve lityum niobate ($LiNbO_3$)' dir.

3.6 Nd:YAG Lazer Cihazlarının Soğutma Sistemleri

Soğutma sistemi lazer cihazının en önemli kritik alt sistemlerinden biridir. Lazer çubuk ve flaş lambası zorlamalı olarak soğutulur. Küçük güçlü sistemler hava ya da nitrojen soğutmalıdır. Gazlar, iyi ısı enerji transferini sağlamaz fakat, düşük darbe enerjili sistemler için gaz soğutması yeterlidir. Gaz soğutmalı sistemler daha az bakım gerektirirler. Darbelerin tekrarlanma oranı sınırlandırılan büyük güçlü darbeli lazerde gaz soğutması kullanılır (O'Shea 1978).

Katı hal lazerlerinde genellikle sıvı soğutmalı sistemler kullanılır. Yaygın olarak kullanılan soğutma sıvısı su ve etil glikozdur. Soğutucu olarak sıvı kullanmak için akışkan çukurlu ve su cebi ile donatılmış olmak üzere iki tip çukur tasarlanmıştır. Akışkan çukurlu lazerlerde soğutucu sıvı çukur içine pompalanarak sızdırmazlık contaları ile uçlarından yalıtılmış olan çubuk ve flaş lambası soğutulur. Diğer bir çukur şeklinde ise, su cebi ile donatılan oyuk içine çubuk ve flaş lambasını ayrı ayrı yerleştirilir. Pompalanan soğutma sıvısı, ilk olarak lazer çubuktan, daha sonra flaş lambasından ve yansıtıcı olarak kullanılan çukurdan dolaştırılır.

Küçük güçlü lazerler, açık döngülü soğutma sistemleri ile lazer çubuk üzerinden soğutucu sıvı olarak su akıtılarak soğutulur. Soğutma için kullanılan suyun filtre edilerek içindeki yabancı parçacıkların uzaklaştırılmış olması gerekir (saf su).

Soğutma sistemlerinde yaygın olarak kapalı kontrol şekli seçilir. Soğutma sistemi parametrelerinin değerleri belirlerken lazerin çalıştırılabileceği maksimum enerji seviyesi ve maksimum süre dikkate alınır (Harry 1974). Soğutma sıvısının ısısı sudan-suya ya da sudan havaya ısı dönüştürücüleri kullanılarak bir başka ortama aktarılır.

Darbeli katı hal lazerlerinin çalışmasında soğutma sıvısının sıcaklığı kritik bir faktördür. Eğer, lazer çubuk malzemenin sıcaklığı toprak seviyesi ile alt lazer seviyesi arasında nüfus terslemesi durumunu gerçekleştirecek değerde olursa bu durum lazer olayının bitmesine sebep olur. Uygulamada soğutma sıvısının sıcaklığı lazer çubukta buğulanma yapmayacak şekilde bir sıcaklık değeri seçilir (Teppo 1975). Eğer sıcaklık değeri çığ noktası altında seçilecek olursa atmosfere açık olan lazer parçalarında buğulanma oluşur. Lazer çubuğunun uçlarında oluşan buğulanma çubuktan lazer çıkışını

engeller. Lazer çubukta ışın çıkışının engellendiği bölge ışın demeti tarafından yakılır. Sonuçta çubuğun zarar görmesiyle lazer olayı biter.

Soğutma sisteminde akışkan sürekliliğinin sağlanıp sağlanmadığı bir adet akış anahtarı ile kontrol edilir. Herhangi bir sebepten sıvı akışının kesildiği durum akış anahtarı ile algılanarak flaş lambasının enerjisi kesilir. Böylece çukur içerisinde aşırı ısınması önlenir.

3.7 Katı Hal Lazerlerin Esas Karakteristikleri

Katı hal lazerlerinden yalnızca Nd:YAG lazer sürekli dalga modunda çalıştırılabilir. Katı hal lazer cihazlarının verimleri (Çizelge 3.2) diğer tip lazerlerden oldukça düşüktür (Kagan 2002).

Darbeli Nd:YAG lazer sistemleri, maksimum 50 joule'luk enerji darbesi üretebilirler. Darbelerin tekrarlanma süresi ayarlanarak sürekli çalışması da sağlanabilir. Endüstriyel Nd:YAG lazerlerin bazıları bir saniyede her biri 20 joule'luk enerji taşıyan 20 darbe üretebilirler (Koechner 1992). Aynı ortalama, güç saniyede yüzlerce darbe üreten düşük güçlü lazerlerden de elde edilebilir. Yüksek güçlü darbeler elde etmek Nd:YAG lazerin özelliklerine bağlıdır.

Çizelge 3.2: Farklı tip lazer cihazlarının özellikleri ve verimleri

Parametreler	Lazer cihazının tipi		
	CO ₂	Nd:YAG	Yarı iletken
Aktif ortam	Gaz	Kati hal	-
Maksimum çıkış gücü(cw, kW)	50	5	0.06-3
Verimi(%)	5-10	3-5	30-60
Odadaki yoğunluk(W/cm ²)	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁵ -10 ⁸	10 ³ -10 ⁵
Dalga boyu(nm)	10.6	1.064	~800-900
Lazer kafası(cm ³ /W)	~200	~20-50	~1
Bakım saati	1000	500	Gerekmez
Kapladığı hacim	Çok büyük	Küçük/orta	Küçük
Fiatı(\$/W)	70	180	70

Katı hal lazerlerinin en verimlisi ve en az pahalı olanı Nd:Cam lazerlerdir. Bu özellik yüksek enerji darbeleri elde etmek için çok yaygın olarak kullanılan cam malzemeden gelmektedir (O'Shea 1978).

Yakut lazerlerin darbeleri olarak mümkün olan en yüksek hızı, 1 s. 1 atıştır. Yakut lazerlerin darbe enerjisi aynı ebattaki YAG lazerden büyük; Nd:Cam lazere ise denktir (O'Shea 1978). Katı hal lazerleri içinde verimi en düşük olmasından dolayı gün geçtikçe kullanım alanını yitirmekte fakat, hala birçok sistemde kullanılmaktadır.

Bir çok organizasyon tarafından katı hal lazer malzemelerin geliştirilerek yeni tip katı hal lazerlerinin ortaya çıkarılmasına çalışılmaktadır. Çizelge 3.3'te farklı tip malzemeler kullanılarak yapılan katı hal lazerleri ve özellikleri verilmiştir (Ready 2002).

Çizelge 3.3: Farklı tip katı-lazer cihazlarının özellikleri

Lazer tipi	Dalga boyu(μm)	Pompalama şekli	Isıl şok (W/cm)	Çalışma modu
Nd:YLiF ₄	1.047, 1.32	Lambalar, Lazer diyet	-	Sürekli, Q Anahtarlama
Nd:YVO ₄	1.06, 1.34	Lazer diyet	-	Q Anahtarlama
Nd:Cam	1.05	Lambalar, Lazer diyet	1.0	Yüksek enerji, kısa darbeleri
Alexandrite	0.7, 0.82	Lambalar	20	Yüksek güç
Cr:LiSAF	0.78, 1.01	Lambalar, Lazer diyet	0.8	Darbeleri, Q Anahtarlama
Ti:Sapphire	0.66, 1.2	Nd:YAG, Ar ⁺	31	Kısa darbeleri
Tm:YAG	2.0	Lazer diyet	6.5	Sürekli, Darbeleri
CTH:YAG	2.1	Flaş Lambası	6.5	Darbeleri, Q Anahtarlama
Ho:YAG	2.1	Lambalar	6.5	Darbeleri, Q Anahtarlama
Er:YAG	2.94	Lazer diyet	6.5	Sürekli, Darbeleri
Yb:YAG	1.03	Lazer diyet	6.5	Yüksek güç, Q Anahtarlama
Yb:SiO ₂	1.0, 1.2	Lazer diyet	31	Sürekli, orta güç
Nd:YAG(SHG)	0.53	Lambalar, Lazer diyet	6.5	Q Anahtarlama

Son on yılda geliştirilen katı hal lazerleri, (Payne 1997) yeni tip lazerlerin geliştirilebileceği (Caird 1991) fikrini ortaya atmıştır. *Alexandrite* Cr dopingli BeAl₂O₄ lazer materyalden iyi bir güç performansı elde edilmiştir. Lazer diyet pompalamalı Cr:LiSAF lazerden darbe süresi <50 fsec olan darbe elde edilmiştir (Keller 1996). Flaş lambalı olarak optik pompalamalı Q anahtarlama Cr:LiSAF lazerden 1-10W güç

düzeyinde darbeler elde edilmiştir (Stalder 1991). 0.78 μm dalga boyuna sahip lazer diyot ile pompalanan Tm:YAG lazerden 2.01 μm dalga boyunda sürekli lazer elde edilmiştir (Honea 1997). Tm:YAG lazerin Tm doping seviyesine bağlı olarak çıkış gücünün değişimi araştırılmış % 2 doping seviyesinde maksimum lazer çıkış gücü elde edilmiştir (Beach 1992). CTH:YAG lazerin materyal işlemede kullanılabileceği gösterildi (Bowman 1991). Tm:YAG ve Ho:YAG lazerlerinin diyot pompalamalı olarak çalıştırılmasında Tm iyon dopingli malzemeden güçlü darbeler elde edilmiştir (Fan 1998). Er:YAG lazerin sürekli veya quasi sürekli çalıştırılmasında 1 Watt mertebesinde güç elde edilmiştir (Page 1997). Yb:YAG lazerin yüksek ortalama güç özellikleri araştırılmıştır (Bibeau 1997, Honea 2000).



4. Nd:YAG LAZERLER İLE MALZEME İŞLEMENİN FİZİK TEMELLERİ VE TEKNOLOJİK ÖZELLİKLERİ

4.1 Malzemelerde Isı Transferi

Bir malzemede ısı transferi üç şekilde gerçekleşir;

- İletim,
- Konveksiyon,
- Radyasyon.

İletim, ısıнын metal boyunca atomdan atoma iletilmesidir. Bir malzemenin iletim kabiliyeti bir katsayı ile verilebilir ve her malzeme için bu katsayı değişiktir. Metaller iyi bir ısı iletkenliğine sahiptirler. Isıl iletkenlik malzemeye uygulanan gücün her metrede meydana getirdiği sıcaklık artışı olarak da tanımlanabilir. Isıl iletkenlik katsayısının birimi $W/(m^{\circ}C)$ dir. Burada, W malzemeye uygulanan güç (Watt), m metalin boyu (metre), $^{\circ}C$ ise metalde meydana gelen sıcaklık artışı (santigrat) dır. Isıl iletkenlik katsayısı, metalin saflık derecesi, hacimsel biçimi ve bulunduğu sıcaklığa bağlıdır. Metalin sıcaklığı arttıkça söz konusu katsayının değeri artar, saflığı bozuldukça bu değeri azalır.

Metallerin ısıyı iletme kabiliyeti ile elektrik akımını iletme kabiliyeti bir birine belli ölçüde bağlı olan parametrelerdir (Allmen 1987). Elektrik geçirgenliği yüksek olan metallerin ısı iletkenliği de yüksektir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1: Metallere ait ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik katsayıları

Metal cinsi	Isıl iletkenlik ($W/(m^{\circ}C)$)	Elektriksel iletkenlik (Ω/m)
Gümüş	106	108
Bakır	100	100
Alüminyum	62	56
Çinko	29	29

Pratik olarak ısı iletiminin kaynak prosesine etkisi şu örnekten anlaşılabilir. 0 °C'deki bir kilogram bakır ve çeliği erime noktasına ulaştırmak için gereken enerji miktarları aşağıdaki gibi belirlenir.

$$Q_{bakır} = mc\Delta t$$

$$Q_{bakır} = 1 \times 0,39 \times 10^3 \times 1083$$

$$Q_{bakır} = 0,422 \times 10^6 J.$$

$$Q_{çelik} = mc\Delta t$$

$$Q_{çelik} = 1 \times 0,45 \times 10^3 \times 1400$$

$$Q_{çelik} = 0,63 \times 10^6 J.$$

Formülde; Q: Enerji miktarı; m: Malzemenin kütlesi, Δt : Sıcaklık artış miktarıdır. Görüldüğü gibi, aynı kütledeki çeliği ve bakır erime noktalarına ulaştırmak için çeliğe daha çok ısı vermek gerekir. Eğer bir bakır malzemenin yalnız az bir kısmı eritmek istenirse o zaman bakır yüksek bir ısı iletkenliğine sahip olduğu için (yaklaşık olarak çeliğin 6 katı kadar) malzemenin tamamı erime noktasına ulaşmayacağından dolayı ısının uygulandığı alan da erimeyecektir. Aynı durumda olan, çelik malzemenin ısı iletkenliği düşük olduğu için malzemenin tamamı erime noktasına ulaşmadan ısının uygulandığı hacimdeki malzeme eriyecektir. Bu nedenle bakır malzemeleri kaynatmak için aynı hacim ve kütledeki diğer malzemelere uygulanması gereken ısıdan daha çok ısı uygulamak gerekir.

Bakır malzemeleri kaynatma işleminde, ısının yayıldığı bölgeyi dar tutmak için başlangıçta söz konusu bölgedeki kütleyi eritmek için gerek olandan çok fazla ısı uygulanmalıdır, diyebiliriz.

Konveksiyon; Isı, kütlelerin bir noktadan başka bir noktaya iletilmesi yoluyla taşınıyorsa bu iletme konveksiyon yolu ile ısı iletimi denir. Örneğin; ısıtılan bir çeliğin hava yolu ile soğutulması bu olaya dayanmaktadır.

Radyasyon; ısı enerjisi darbelerinin radyasyon olarak uzayda yayılma şeklidir. Isının yayılması, ışığın yayılmasına benzer ve aynı karullara tabidir. Kaynak işlemi esnasında ısıdan etkilenen bir bölge oluşur (*HAZ-Heat-Affected Zone*). Bu bölgedeki ısı iletim, konveksiyon ve radyasyon şeklinde diğer bölgelere yayılır. Kaynak işlemi esnasında yayılma bölgesini daraltmak için kaynak bölgesinin çeşitli şekillerde soğutulması gerekir.

4.2 Lazer Işınının Metal Malzemelerle Etkileşimi

Lazer darbe genişliği 10^{-9} s.'den fazla olmayan ve güç yoğunluğu 10^8 - 10^9 W/cm² bandını aşmayan ışın demeti ile malzemenin şualandırılması sonucunda malzemede oluşan ısı miktarının belirlenmesi için geleneksel ısı iletme teorisi kullanılabilir (Rykalın ve ark. 1978). Çok sayıda araştırmalar göstermiştir ki malzemelerin şualandırılması sonucunda meydana çıkan termal efektler sayesinde aşağıdaki problemlerle karşılaşılır.

- Değişik malzemelerin lazer ışını yutması ile meydana çıkan ısı kaynaklarının Mekan-Zaman karakteristiklerinin analizi,
- Işığın malzemelere olan etkilerinin esas niteliklerini dikkate alarak, ısı geçiricilik problemi için sınır değerlerini belirleyip lazer ışınının, yapacağı etkinin formülleştirilmesi,
- Sınır değerleri problemlerinin analizi için yaklaşık ve kesin teknikler geliştirerek sıcaklık alanlarının incelenmesi,
- Deneysel yollarla elde edilmiş olan verilerle uyumlu ve teorik geliştirme için yararlı olan analitik formüllerin geliştirilmesi,
- Her bir özgül teknoloji proses için malzemenin yüzeyinde ve oylumunda oluşabilecek sıcaklık alanlarının mümkün olabilecek varyasyonlarının incelenmesi ve bunlara bağlı olarak şualandırma darbesini niteleyen parametrelerin belirlenmesi.

Işık geçirmeyen malzemelerin lazerle şualandırması sonunda oluşan ısı kaynağının Mekan-Zaman karakteristiklerini belirlemek için şua enerjisinin bu malzemeler tarafından yutulma derecesinin bilinmesi gerekir. Bilindiği gibi, bu amaç için en uygun olan yaklaşım normal dağılımdır (Rykalın ve ark. 1978). Isı kaynakları teorisinde bu yaklaşımı kullanarak kaynak yapma, delme ve malzeme işlemenin başka alanlarında önemli neticeler elde edilmiştir. Bir çok teorik ve deneysel sonuçlar lazer demeti şiddetinin uzaysal dağılımının normal dağılıma çok yakın olduğunu göstermiştir (Brekhovskikh ve ark. 1967, Rykalın 1951).

Isı prosesleri teorisinde termal şiddet değişimlerinin uzaysal dağılımı için iki model kullanılmaktadır: Gauss dağılımı (4.1) ve Üniform dağılım (4.2). Bu dağılımlar uygun olarak aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$I(r) = I_0 \exp(-k_0 r^2) , \quad r > 0 \quad (4.1)$$

$$I'(r) = \begin{cases} I_0, & \text{eğer } W_0 \geq r \geq 0 \\ 0, & \text{eğer } r > W_0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Burada; k_0 (birimi cm^{-2}): ışının odaklanma hususlarına bağlı olarak yoğunlaşma katsayısı, I_0 : şualandırma yoğunluğu (W/cm^2), r : Odak lekesinin merkezine olan uzaklık, W_0 : odak noktasında meydana gelen lekenin yarıçapıdır.

Eğer malzemeye uygulanan lazer ışın darbesinin genişliği birkaç milisaniye ve darbe güç yoğunluğunun $I_0 = 10^4 - 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ olduğu düşünülürse o zaman aşağıdaki önemli özellikleri göz önünde tutmak faydalı olabilir:

Bir çok durumlarda, şualandırma neticesinde malzemenin yüzeyinde kaybolan ısı miktarı göz ardı edilebilir.

Genellikle malzemenin sıcaklığı ile optik ve termal parametreleri arasında bağıllık vardır. Fakat çoğu durumlarda, şualandırma ile etkilenen bölgenin yerinin ve ölçülerinin sıcaklık değişmelerine karşı tepkisi, dikkate alınmayacak kadar küçüktür.

Faz geçişleri (erime, kristalleşme, buharlaşma) ısınısını dikkat merkezinde tutmak özellikle faydalıdır. Çünkü bu olaylarda buharlaşma, gaz ve katı ürünlerin ayrılması, enerji dengesinde önemli rol oynamaktadır. Bir malzeme üzerinde kaynak işlemine başlamadan önce, malzemenin erimesi için gereken ısı miktarı dikkate alınarak, lazer şualandırma güç yoğunluğunun belirlenmesi gerekir.

Termal prosesler teorisi çerçevesinde, lazer ışının malzemelere olan etkisi yalnız şualandırma yoğunluğu $10^8 - 10^9 \text{ W}/\text{cm}^2$ sınırının altında olduğu durumlarda belirlenebilir. Şualandırma yoğunluğu daha yüksek olduğunda, söz konusu amaçla Patlama ve ona refakat eden Şok Dalgalar (malzemenin oylumunda dolaşırlar) teorisini uygulamak gerekecektir. Lazer demetinin enerjisinin yutulduğu ince yüzey tabakası patlayıcı gibi davranır. Bu şartlar altında şok dalgaların yarattığı basınç, malzemenin gerilme kuvvetinden büyük olduğunda malzeme yarılr (Kaparsky ve ark., 1968). Şualandırma yoğunluğu $I_0 \approx 10^{12} - 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ olan lazerlerin malzemede oluşturduğu şok dalgalar faz ve yapı değişikliğine sebep olur.

Güç yoğunluğunun hacimsel dağılımı (I_v) formül 4.4'den hesaplanabilir (Ion 1992).

$$I_v = \frac{2PA}{\pi W_0^2 Z_m} f(x, y) e^{-xz} \quad (4.4)$$

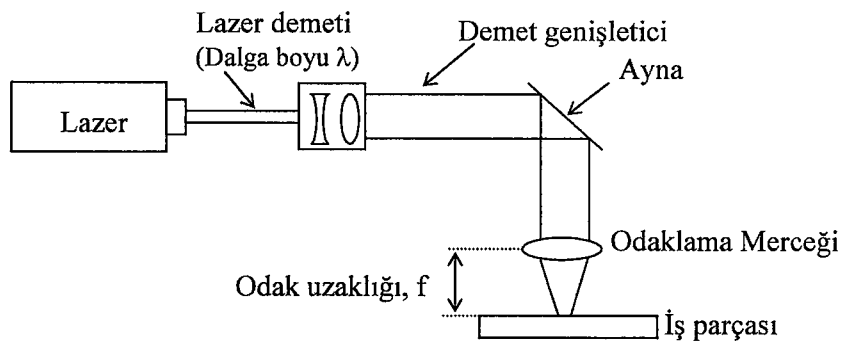
Formülde; $f(x, y)$: Lazer şuasının dağılımı, P: Lazer demetinin gücü, A: Malzemenin ışıma yutma katsayısı, Z_m : Saçın kalınlığı, x: Malzemenin ısı nüfuz katsayısı, W_0 : Lazer demetinin yarı çapıdır.

4.3 Metal İşleme Çeşitleri Ve Bunlar İçin Kullanılan Lazerler

Lazer cihazları, genellikle materyal işleme alanında aşağıdaki işlemleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadırlar.

- Isıl işlemi,
- Delme işlemi,
- Markalama işlemi,
- Kaynak işlemi.

Bu işlemleri gerçekleştirmek için, sürekli veya darbeli Nd:YAG ve CO₂ lazerler kullanılmaktadır. CO₂ lazerin çıkış gücünün geniş sınırlar arasında değişebilmesi ve maliyetinin makul olması nedeniyle kullanım alanı oldukça geniştir. Bunun sebeplerinden biri de CO₂ lazerler kaynak kalitesinin ve hızının yüksek olmasıdır. Şekil 4.1'de malzeme işlemede kullanılan lazer düzeneği verilmiştir.



Şekil 4.1: Malzeme işlemede kullanılan lazerin prensibi

Darbeli modda çalışan Nd:YAG lazerler bir saniyede 4000 darbe üretebilirler. Nd ile katkılanmış (*doping*) lazerlerde Q anahtarlama kullanılarak oldukça kısa süreli (10^{-12} s) ve oldukça büyük tepe gücüne sahip darbeler elde edilebilir. Çizelge 4.2’de metal malzemelerin işlenmesinde kullanılabilecek lazer tipleri ve tipik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.2: Endüstride kullanılan lazerlerin karakteristik özellikleri

Lazer tipi	Elektriksel Verim	Dalga Boyu (nm)	Sürekli gücü (W)	Odak tepe Gücü (W)	Üretim uygulaması
CO ₂	>10	10600	>1000	10^8	Kesme, delme, markalama, kaynak, vb. ısıtma işlemi
He-Ne	<0.1	633	0.002	10^{-3}	Ayarlama, dalga kılavuzu
Nd :Cam	>1	1060	>1000	10^9	Delme, kaynatma
Nd: Yakut	<0.15	694	0.05	10^8	Delme
Nd:YAG	>10	1060	>100	10^8	Kesme, delme, markalama, kaynak, vb. ısıtma işlemi

Kızıl ötesi dalga boyundaki ışınları; plastik, cam, lastik, ağaç, elbise, metal ve seramik malzemeler çok iyi yuttuğu için, bu malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak CO₂ lazerler kullanılır. CO₂ lazer cihazının ürettiği ışın demetini, dalga boyu 10.6 μ m, iş parçası üzerine fiber optik kablo ile taşımak mümkün olmadığı için, bu amaç için parlatılmış bakır levhalar kullanılır. Bakırın lazer ışın demetini yutma katsayısı oldukça düşük (yansıtması yüksek), ısı iletkenliği ise oldukça yüksektir. Bu tip yansıtıcıların yuttuğu ışının ısıya dönüşen kısmı, hava püskürtmeli bir sistem kullanılarak bakır üzerinden uzaklaştırılır. 10,6 μ m dalga boyundaki ışınları galyum ve arsenik çok iyi iletmediği için düşük güçlü CO₂ lazerlerin odaklama mercekleri bu malzemelerden yapılır.

Lazer ışın demeti ile malzeme üzerinde bir ısıtma işlemi yapmak için lazer cihazının gücünden ziyade, malzemenin birim alanına düşen ışın gücü daha önemlidir. Bu parametre güç yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Lazer ışınlarının uyumluluğu ışın demetinin çok küçük bir alana odaklanabilmesini ve çok büyük bir tepe gücü yoğunluğunun elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Elde edilen güç yoğunluğuna bağlı olarak kesme, eritme ve materyaller üzerinde ısıtma işlemlerinin yapılmasına imkan sağlamaktadır. Çizelge 4.3’de güç yoğunluğuna bağlı olarak malzeme üzerinde gerçekleştirilebilecek ısıtma işlemleri belirtilmiştir.

Yüksek güçlü lazerlerin en dikkat çekici uygulamalarından biri de ince saç levhaların yüksek hızla kaynak yapılmasıdır. İnce paslanmaz çelik saçların 20-50 m/dak hızla ve kaliteli bir şekilde kaynatılabileceği gösterilmiştir (Nath 2002).

Çizelge 4.3: Lazer güç yoğunluğuna göre uygulama alanı

Güç Yoğunluğu(W/cm^2)	Materyalin tepkisi	Tipik uygulaması
$<10^4$	Isınma	Isıtma, ısı işlemler
10^4-10^6	Erime	Kaynak
10^6-10^8	Buharlaştırma	Kesme, delme

Baskılı devre plakettekinde oluşan kısa devrelerin ortadan kaldırılması için de lazer kullanılabilir. Kısa devreye neden olan bölgeye, burada bulunan metal malzemeyi buharlaştıracak kadar lazer güç yoğunluğu uygulanarak kısa devre ortadan kaldırılır. Baskılı devre imalatında fotografik yöntemler yerine, 2 W'lık çıkış gücüne sahip, sürekli modda çalışan ve demet dağılımı TEM_{00} (*gausyen*) olan Q anahtarlama bir lazer cihazı kullanılarak baskılı devre çıkarılabilir.

Kesilmiş metal film dirençlerin işlenmesinde de yaygın olarak lazerler kullanılır. Üretim esnasında elde edilen metal film dirençlerin değeri istenenden küçük olur. Metal film direncin uçlarına yerleştirilen iki kontak yardımı ile üzerinden sabit bir akımın geçmesi sağlanır. Malzeme üzerine odaklanmış lazer ışın demeti ile direnç değerini belirleyen metal film tabaka, kademe kademe buharlaştırılırken (direnç değeri artar) direnç kontakları arasında düşen gerilim değeri izlenir. Bu gerilim, söz konusu direnç üzerinde düşmesi gereken değere ulaştığı an (istenilen direnç değeri elde edildiğinden), malzemeye ışın uygulanmasına son verilir.

4.3.1 Isıl İşlem

Metal ve bazı materyalleri sertleştirmek için söz konusu malzemeler genellikle belli bir zaman süresince ısıtılır. Isıl işlem, takım aletleri ve otomobil endüstrisinde parçaları sertleştirmek için kullanılır. Örneğin, otomobillerde kullanılan piston üzerinde bulunan sekman yataklarının sertleştirilmesi için lazer ışın

demeti kullanılabilir. Isıl işlemin uygulanması aşamasında piston ölçülerinin belli bir değerde tutulması gerekir. Lazer ışın demeti belli bir bölgeye odaklanarak istenen şartların yerine getirilmesi kolayca sağlanabilir. Bir yansıtıcı kullanılarak lazer ışın demeti, piston sekman kanalları içinde farklı pozisyonlara yönlendirilebilir.

Isıl işleme başlamadan önce lazer ışın denetinin malzeme tarafından daha çok miktarda yutulması istenen bölgeler özel boyalar ile boyanır. Lazer ışın demeti ile malzemenin bir bölgesi erime noktasına çıkarılarak, başka bir malzemenin bu bölgeye ilave edilmesiyle bölgesel olarak malzeme özelliğinin istenen şekilde değiştirilmesi sağlanabilir.

4.3.2 Delme İşlemi

Malzemenin delinmesinde lazer kullanmanın avantajları arasında hızlı olması ve bakım ücretlerinin az olması da sayılabilir. Delme işleminde kullanılan diğer cihazların yerine lazer kullanılması bakım ücretlerini makul ölçüde azaltmaktadır.

İstenilen derinliğe ulaşmak üzere malzeme yüzeyine hesaplanan sayıda darbenin uygulanması ile delme işlemi gerçekleştirilir. Bu sebepten delmede kullanılan lazer cihazları darbeli modda çalıştırılır.

Lazer kullanılarak malzemeye temas etmeden delme işlemi gerçekleştirmek için lazer parametreleri ve uygun optik parçaların seçilmesi ile (mercekler, maskeleme, yansıtıcılar ve saptırıcılar v.s.) gereken hassasiyette delikler açılabilir.

4.3.3 Markalama İşlemi

Lazerin elektronik endüstrisinde önemli uygulamalarından biriside, entegre devrelerin silikon alumina esaslı tabanlarının üzerine yapılan markalama işlemidir. Önceleri tanıtıcı bilgiler, entegre üzerini kazıyarak veya kesici bir alet kullanılarak yapılmıyordu. Bu yolla yapılan markalama işlemi, bazı entegrelerin bozulmasına sebep olmaktaydı. Markalama işleminin lazer ile gerçekleştirilmesi, ışın hızını ve markalama için harcanan birim maliyetin düşmesini sağladı.

Entegreleri markalamak için kullanılan tipik bir lazer cihazının tarama hızı 35 cm/s kadardır. Lazer ışın demetinin odak leke çapı mümkün olduğunca küçültülerek,

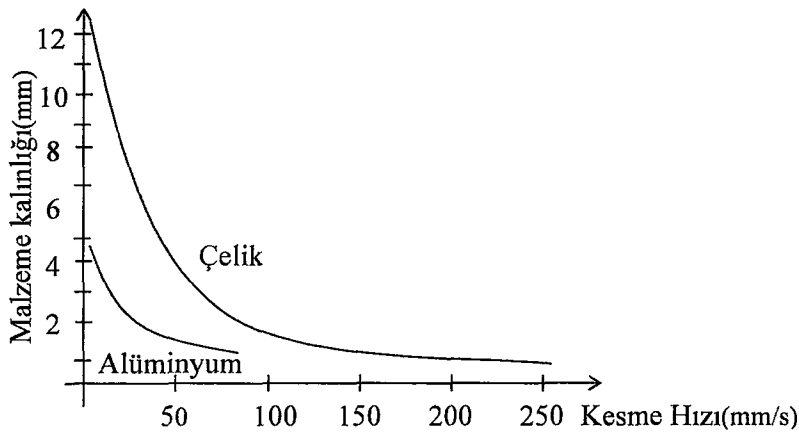
baskılı devre üzerine yerleştirilecek elektronik elemanlar arasındaki mesafe oldukça azaltılabilir ve elde edilmek istenen devrelerin daha az yer kaplaması sağlanır. Seramik ve alumina malzemeler 10,6 μm dalga boyundaki ışını çok iyi yuttukları için bu tip malzemelerin markalanmasında CO_2 lazerler kullanılır. Söz konusu malzemelerin markalanması için güç yoğunluğu 10^8 W/cm^2 , darbe tekrarlama oranı 10 kHz ve odak leke çapı 25 μm 'den az olan bir Nd:YAG kullanılarak da gerçekleştirilebilir.

4.3.4 Kesme İşlemi

Metal malzemelerde delik açma işi de kesme ile yapılır. Açılmak istenen delik konturuna uygun olarak, odaklanan lazer ışın demeti, malzeme üzerinde gezdirilir. Cam ve kuartz malzemeler, 10.6 μm dalga boyundaki ışınları çok iyi yuttuğu için yüksek güçlü CO_2 lazerler kullanılarak kolayca kesilebilirler.

Organik malzemelerin kesilmesinde lazer ışın demetine gaz jeti ilave edilebilir. Kesme esnasında kesilen malzemeye doğru, belli bir akış hızında hava veya nitrojen gazı göndererek derinlemesine nüfuz eden kesme işlemi gerçekleştirilebilir.

Örnek olarak, Şekil 4.2'de iki tip metalin aynı lazer cihazı ile kesilmesindeki performans değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Lazer ile iki metalin kesilme performansının kalınlığa bağlı olarak değişmesi

4.3.5 Kaynak İşlemi

Kaynak işlemi, iki materyalin birleştirilmesi için yapılmaktadır. Amerikan standartlarında kaynak işlemi;

- Basınç uygulayarak,
- Basınç uygulamadan,
- Dolgu malzemesi kullanarak,
- Dolgu malzemesi kullanmadan.

materyallerin eritilme yolu ile birleştirilmesi işlemi olarak tanımlanmaktadır (Lankalapalli 1996). Kaynak işleminin tanımı alışıla gelmiş ark kaynağı, direnç kaynağı, elektron ışın demeti kaynağı ve lazer kaynağını gibi çeşitlerin tümünü kapsadığı için tanımı bu şekilde yapılmıştır.

Metallerin bir birine kaynak yapılması üç değişik şekilde olabilir.

- Otojen kaynak : Aynı cins malzemelerin bir birine dolgu malzemesi kullanmaksızın kaynak yapılması
- Homojen kaynak : Birleştirilecek malzemelerle, birleştirme için kullanılan dolgu malzemesinin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri özdeş yada yakın olan malzemelerin kaynak yapılması
- Heterojen kaynak: Kimyasal ve mekanik özellikleri özdeş olan malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri farklı dolgu malzemesi kullanılarak kaynak yapılması (Kaynatılacak malzemeler ile dolgu malzemesinin erime noktaları aynı olmalıdır.)

Lazer demet kaynağı, elektron demet kaynağı kadar yüksek kalitede vakum ortamı gerektirmeden ve kaynak işlemi esnasında X- ışınları üretmeden gerçekleştirmektedir. Lazer ışık demetinin yüksek derecede uyumluluğu odaklanarak çok küçük bir noktaya 10^6 W/cm²'nin üzerinde bir güç yoğunluğu uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Bu güç yoğunluğunda, malzeme tabanında ısı yayılımı çok hızlı bir şekilde (iletim mekanizması ile) gerçekleşmektedir.

Kaynak amaçlı lazerlerdeki güç yoğunluğu 10^6 W/cm²'den büyüktür (Çizelge 4.4). Bu değer ark kaynakları için 5×10^2 ile 5×10^4 W/cm² arasında oksijen kaynağında ise 10^2 ile 10^3 W/cm² arasındadır (Metzbower 1983 ve Mazumder 1983). CO₂ lazerlerin kaynak kalitesinin mükemmel, üretim hızlarının fazla olması nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Malzemeye uygulanan lazer

enerjisinin süresi, ortaya çıkan ısıнын malzemede konveksiyon ve radyasyon şeklinde yayılmasına yeterli olmamaktadır. Malzeme yüzeyine uygulanan enerji iş parçası içine iletim yolu ile taşınmaktadır.

Çizelge 4.4: Metal kaynak çeşitleri ve güç yoğunluk değerleri(Du 2000)

Kaynak tipi	Isıya dönüşen güç yoğunluğu(W/cm ²)
Akı korumalı ark kaynağı	$5 \times 10^2 - 5 \times 10^4$
Gaz korumalı ark kaynağı	$5 \times 10^2 - 5 \times 10^4$
Plazma kaynağı	$5 \times 10^2 - 5 \times 10^6$
Lazer veya elektron demet kaynağı	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^8$

4.4 Lazerle Kaynak İşleminin Kalitesini Etkileyen Unsurlar

Lazerle kaynak işleminin kalitesi, lazer parametreleri ve işlem şartlarına çok yakından bağlıdır. Bu işlem bir grup parametre ile karakterize edilmektedir. Bu parametreler kullanılacak lazerin tipini, iş parçası üzerine ışın demetinin odaklanma biçimini, güç dağılımını v.b. ifade ederler. Daha ayrıntılı olarak bir lazerin parametreleri; demet biçimleyici merceklerin odak uzaklığını, odak leke boyutunu, odak derinliğini, demet ayarlarını ve onların kararlılıklarını kapsarlar. İşlem parametrelerine gelince ise bunlar; kaynak hızını, malzeme seçimini, kaynatılacak malzemelerin sabitlenmesini, kaynak şeklini, kaynak bölgesinin ön hazırlanmasını, genişlik toleransını ve temizliğini, koruyucu ve destekleyici gazların tipini ve saçılmalara karşı koruma niteliklerini kapsar. Bu faktörlerin tamamı, kaynak kalitesini ve aynı kalitenin tekrarlanabilirliğini belirler.

Lazerle kaynak işlemi esnasında gerekli işlem parametreleri seçilirken teorik hesaplamalardan, denemelerden ve deneyimlerden faydalanılır. Bu yolla söz konusu parametreler için denenerek en uygun değerler seçilir. Bu parametrelerin değerlerinin yanlış seçilmesi sonucunda kaynak kalitesinde kırıklar meydana gelebilir. Ayrıca, iyi temizlenmemiş yüzeylerde yapılan kaynak, sonradan kolaylıkla korozyona uğramasına, yüksek karbonlu çeliklerde ise malzeme özelliğinin bile bozulmasına sebep olabilir.

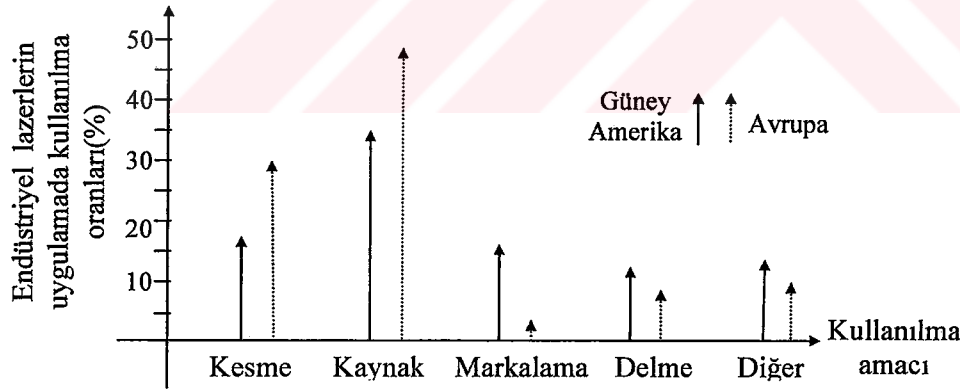
4.5 Lazerle Kaynağın Temel Prensipleri Ve Uygulama Alanları

Lazer kaynağı, teknolojik şartlara bağlı olarak, iki temel prensipten birini esas alarak gerçekleştirilmektedir;

- Derinlemesine nüfuz eden lazer kaynağı (*Key Hole Laser Welding*),
- İletimsel lazer kaynağı (*Conduction laser welding*).

Yüksek güçlü lazerlerin en önemli uygulama alanlarından biri, sac malzemelerin kaynak yapılması işlemidir. Bu tür kaynağın en geniş ve vazgeçilmez uygulama alanı otomobil sektörüdür. Bu alan lazerle imalat teknolojisi pazarının % 30'unu kapsamaktadır (Irving 1992). Bunun dışında, değişik amaçlı malzemelerin birleştirilmesi için de lazer kaynağı kullanılmakta ve lazerlerin bu alanda uygulanması hızla genişlenmektedir (Kagan ve ark. 2002). Günümüzde yapımı çok zor olan metal parçaların malzeme kalıplarını dökmek yerine basit kalıplardan malzemeler dökülerek daha sonra lazer kaynağı ile birleştirilip karmaşık ve zor yapılar kolayca elde etmek mümkündür.

Şekil 4.3'de Avrupa ve Kuzey Amerika da lazer kaynağının kullanılma amaçları gösterilmiştir (Roessler 1996).



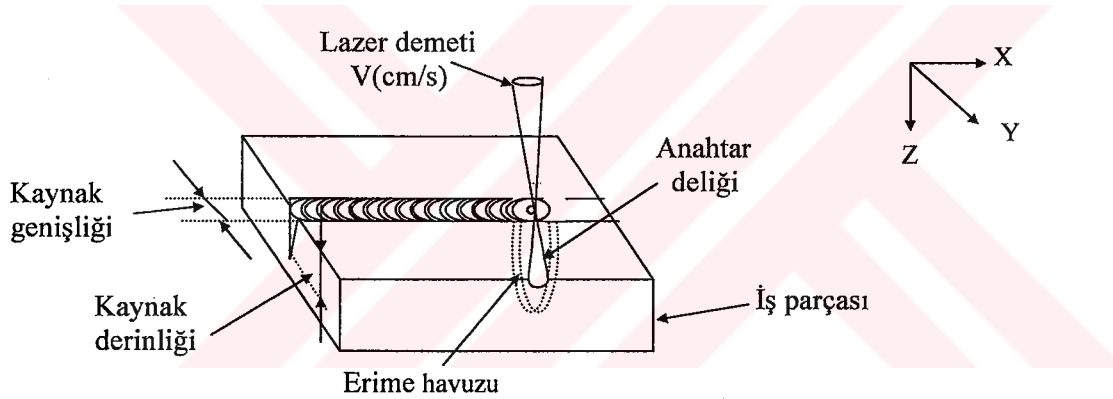
Şekil 4.3: Güney Amerika ve Avrupa sanayisinde mevcut bulunan lazer cihazlarının amacına göre malzeme işlemede kullanılma oranları

4.5.1 Anahtar Deliği Yöntemiyle Lazer Kaynağı

Derinlemesine nüfuz yöntemi ile elde edilen lazer kaynağına Anahtar Deliği (klavuz çukur) manasına gelen “KEY HOLE” yöntemi de denir. Eğer, yeterince güç

yoğunluğuna sahip olan lazer ışın demeti malzeme yüzeyine odaklanırsa anahtar deliği elde edilir (Arata 1987, Beersiek 2000). Bu anahtar deliğinin oluştuğu yerde bir erime havuzu meydana gelir. Söz konusu yerde eriyik halde bulunan malzeme yer çekimi, yüzey gerilmesi ve buhar basıncının etkisi ile kararlı bir dengede bulunur. Anahtar Deliği mekanizmasında 1:10 oranında en:boy değişimi söz konusu olur (Du 2000). Bu mekanizmanın ayrıntıları Lancaster (1986) tarafından bulunmuş ve uygulamada kullanılabilecek bir konuma getirilmiştir.

Anahtar Deliği, eriyen metal ve onun dışını çevreleyen katı metalden oluşur. Bu delikte oluşan buhar basıncı, malzeme yüzeyindeki gerilme ve eriyen metalin hidrostatik basıncı ile dengelenir. Şekil 4.4’de anahtar deliği oluşturmak suretiyle lazerle kaynak işleminin gerçekleştirilmesi gösterilmiştir (Lankalapalli 1996). Anahtar deliği, iş parçası üzerinde kararlı bir hızla hareket ettirilir.



Şekil 4.4: Lazer kaynak işleminin şematik gösterimi

Yukarıda söylenildiği gibi, lazer ışın demeti ile materyal buharlaştırılarak *Anahtar Deliği* denilen bir çukur oluşturulur. Anahtar deliği oluştuktan sonra delik bölgesindeki eriyen malzemenin lazer ışınını yutma oranı % 98 ‘e ulaşır (Steen 1991) ve burada bir erime havuzu oluşur. Bundan sonra, iş parçası veya ışın demeti sabit bir hızla hareket ettirilmeğe başlar ve ışın, iş parçası üzerinde sürüklenir. Bu durumda, çukurun hareket istikameti tarafında erimiş durumda bulunan metal, siyah cisim gibi davranarak malzeme yüzeyine çarpan lazer ışın demetinin büyük bir

kısmını yutar. Bu yolla metal, ışının hareketi istikametinde eritilir, geride kalan eritilmiş kısım ise katılaşır.

Uygulanan lazer ışın demetinin gücü, seçilmiş olan hareket hızında metali eritecek kadar büyük, ama çukurdaki metali buharlaştırıp yok etmeyecek kadar düşük olarak seçilmelidir. Ayrıca, kaynak çukuru oluşunca, malzeme yüzeyine çarpan ışın gücünün kontrollü bir şekilde azaltılması gerekir.

Kaynak çukuru oluşturarak malzemelerin kaynak yapılması işlemi, özellikle kalın saçların kaynak edilmesi için uygun olan bir yöntemdir. Bu yöntemin performansı, saçın kalınlığına çok bağlıdır. Mesela, 0,1 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik saç, 1200 W lazer gücünde 20 m/dak. hız ile kaynatılabildiği halde, 1.55 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik saç 2250 W lazer gücünde ve sadece 3 m/dak hız ile kaynatılabilmektedir (Nath 2002).

Lazer kaynağı için sarf edilen enerji miktarını hesaplamak için, lazer kaynak hızı kaynak derinliği ve gücü arasında formül 4.5'deki gibi bir ilişki kurulabilir.

$$P_{fs} = \frac{P_{avg}}{z \cdot v} \quad (4.5)$$

Formülde; P_{fs} : Birim alana harcanan enerji miktarı (kWh/m^2), z : Kaynak derinliği (m), v : Kaynak hızı (m/h), P_{avg} : Malzemeye uygulanan ortalama lazer gücü (kW) dır. Yukarıda gerçekleştirilen dememeler için birim alana harcanan enerjiyi hesaplayacak olursak; Birinci durumda $1,2/(0,0001 \times 20 \times 60) = 10 \text{ kWh/m}^2$ ikinci durumda ise $2,250/(0,00155 \times 3 \times 60) = 8 \text{ kWh/m}^2$ olarak belirlenir. İkinci durumda birim alana harcanan enerji az olduğu için kaynak işlemi daha ekonomik olarak gerçekleştirilmektedir. Uygulamada kaynak derinliği arttıkça kaynak hızının ve birim alan kaynak maliyetinin azalmasından bahsedebiliriz. Kaynak işlemi ekonomik olarak (anahtar deliği yöntemi ile kaynakta lazer kaynak gücü yüksek olduğu için) ince saçların yüksek kaynak hızında kaynak yapılması işlemi ile gerçekleştirilebilir diyebiliriz.

Lazer ışın demetinin enerjisi malzemede ısı enerjisine dönüşür. Söz konusu ısı, malzemesinin derinliklerine doğru iletim yolu ile yayılır.

Lazer ile şualandırmanın etkilerini inceleyebilmek için enerji parametreleri olarak tanımlanan aşağıdaki verilerin kesin bir şekilde bilinmesi gerekir:

- Malzemeye çarpan şuaların malzeme tarafından yutulan kısmı,
- Güç yoğunluğunun en yüksek değeri,
- Işının odaklama şartları.

Bu enerji parametreleri ise aşağıdaki fiziksel yapı özellikleri ile belirlenmektedir:

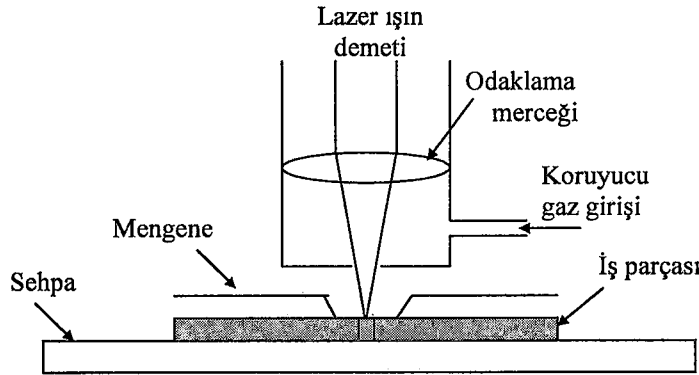
- Lazerin tipi (Darbeli yada Sürekli dalga modu),
- Aktif ortam (Lazer demetinin dalga boyu),
- Pompalama tekniği ve pompalama sisteminin tasarım özellikleri,
- Rezanatörün fiziksel yapısı,
- Optik odaklama sistemi,
- Şualandırılan malzemenin optik parametreleri.

4.5.2 Lazerle İletimsel Kaynak

Malzemelerin kaynak yapılmasında kullanılan lazer iletim (*Conduction laser welding*) prensibinin ana fiziksel temeli, malzemenin lazer ışın enerjisini yutarak, kaynama noktasına ulaşabilmesidir. Kaynama noktasına ulaşan malzemelere uygulanan sabit bir kuvvet, bu malzemelerin birleşmesine sebep olur. Lazer ile iletimsel kaynak, lazer güç yoğunluğunun malzemenin kaynama noktasına ulaştırılmasına yetmediği, fakat malzemeyi eritebildiği durumlarda kullanılır. Tam olarak derinlemesine nüfuz eden kaynak ise ince malzemelerde yapılabilir. Lazer ile iletimsel kaynakta, kaynak çukurunun yüksek oranda en boy oranına sahip olması mümkün değildir. Eğer yüksek güç yoğunluklu lazerler kullanılarak ince metallerin kaynak yapılması istenirse kaynatma yerine kesme işlemi oluşur. Bazı araştırmalar gösteriyor ki lazer ile iletimsel kaynak kalınlığı $0,5 \text{ mm}^2$ 'nin altında olan malzemelerin kaynak yapılması için uygundur (Noaker 1993).

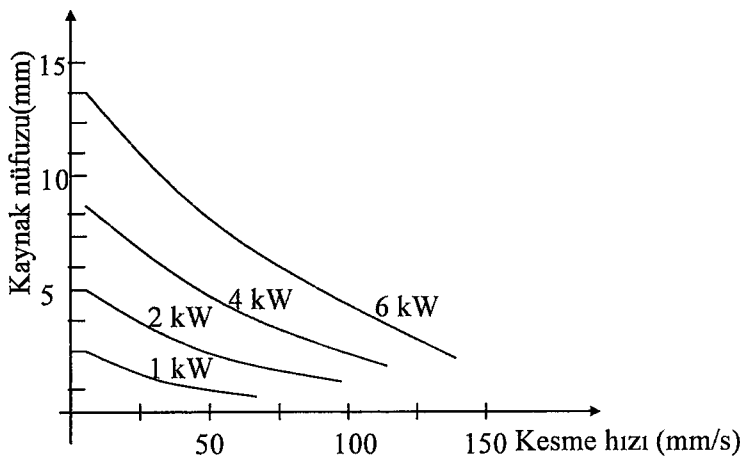
İletimli lazer kaynağı Şekil 4.5'de gösterilen düzenek, ince metallerin kaynak yapılmasında kullanılır. Genellikle iş parçası yüzeyinin altına odaklanan lazer ışın demeti yüzeye çarpar. Bu demetin bir kısmı malzeme tarafından yutulur bir kısmı ise yansıtılır. Malzeme tarafından yutulan yüksek güçlü ve kısa süreli lazer ışınları sayesinde meydana çıkan ısı, konveksiyon ve radyasyon şeklinde yatay yayılma

imkanı bulamadan iletim yolu ile malzemenin kalınlık eksenini boyunca derinliklere yayılır. Bu yüzden malzemenin odak lekesi çapındaki silindirik kısmının bütün noktalarında sıcaklığın aynı olduğu kabul edilmektedir. Lazer ışık enerjisini yutarak eriyen metalin oluşturduğu kaynak çukuru, lazer ışın demetinin uzaklaştırılması ile katılaşır.



Şekil 4.5: İletim lazer kaynağı için kullanılan yaygın bir düzenek

Bazı durumlarda, çok küçük nokta kaynağı için darbe üreten lazer kaynağının tek darbesi yeterli olur. Eğer sürekli formda kaynak işleri yapılacaksa, lazer demeti iş parçası üzerinde hareket ettirilir. Nokta kaynağı yapmakta kullanılan lazer darbelerinin malzeme üzerinde üst üste bindirilmesi ile sürekli kaynak işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 4.6'da 304 tipi malzemenin kaynak yapılması, tarama hızına bağlı olarak nüfuz etkisi ve lazerin gücüne bağlı olarak malzemeye nüfuz eden kaynak derinliği gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Paslanmaz çelik kaynatmada kullanılan değişik güçlerdeki CO₂ lazerlerin kaynak nüfuz derinlikleri

Lazerle iletimsel kaynak işleminde birkaç parametre kaynak kalitesinde etkilidir. İşlem parametreleri şunlardan oluşur.

- Lazer ve Mercek: Dalga boyu, güç, ışın leke boyutu, modu(sürekli dalga veya darbeli), odak pozisyonu, odak uzaklığı,
- İş Parçası: Kimyasal karışım, fiziksel özellikleri, kalınlığı, yüzey durumu,
- Koruyucu Gaz: Karışım, akış hızı, basınç, meme boyutu ve pozisyonu,
- Kaynak karakteristiği: Kaynak hızı, birleştirme geometrisi, aralık toleransı.

Lazerle iletimsel kaynak elektronikte, uzay taşıtlarında ve tıpta yaygın olarak kullanılır. Araç gövdelerini oluşturan ince metallerin birbirine kaynak yapılması lazerle iletimsel kaynağının yaygın olarak kullanıldığı önemli bir uygulama alanıdır.

Günümüzde, kaynatılabilirlik açısından ve bir sıra *konstruktif*-teknolojik özelliklerden dolayı, malzeme olarak, otomobillerin gövdesinin yapımında karbon çeliği kullanılır. Gelecekte; araçların ağırlığını azaltmak, yakıt ekonomisi ve diğer ihtiyaçları karşılamak amacı ile kafes yapısı düşük alaşımlı çelik saçlardan oluşan araçlar kullanılacaktır (Ashly 1997).

4.6 Lazerle Kaynak İşleminin Avantaj Ve Dezavantajları

Çok sayıda araştırma ve uygulama, lazer kaynağının hassas ve yüksek kalitede bir birleştirme sağladığını göstermiş ve bu olgu, bilimde araştırılması gereken bir alan, teknolojiye ise uygulanması ve geliştirilmesi gereken bir malzeme işleme yöntemi haline gelmiştir (Li ve ark.1997, Kawano ve ark. 1998, Lin ve ark. 2000, Kang ve ark. 2001, Bagger ve ark. 2001).

Diğer kaynak yöntemlerine nazaran lazer kaynağına üstünlük kazandıran en önemli nitelikler aşağıdakilerdir:

- Lazer, temiz bir enerji kaynağıdır,
- Kaynak işlemi, dolgu malzemesi kullanarak yada kullanmadan gerçekleştirilebilir,
- Kaynak işlemi, yüksek oranda en:boy değişiminde ve ısıdan etkilenen dar bir bölgesinde meydana gelir,
- Kaynak hızı yüksektir,
- Lazer kaynak işlemi kolaylıkla otomasyona tabi tutulabilir,

- Aynı ve farklı metaller kaynatılabilir,
- Optik olarak geçirgen (şeffaf, saydam) materyallerin yardımı ile kaynak ortamındaki hava şartları kontrol edilerek gerçekleştirilebilir.

Lazer kaynağı işleminin bazı kusurları da vardır. Sert metallerin darbeli lazerlerle kaynak yapılması, kaynak bölgesinde mikroskopik kaynak kesintilerin oluşmasına, bu ise kaynağın kırılkan olmasına sebep olmaktadır. Ancak bu kusur, geleneksel kaynak yöntemlerinin aynı tipten olan kusurları ile mukayese edildiğinde önemsiz bile görülebilir. Kaynak işlemi esnasında iş parçası çok iyi sabitlenmeli ve ışın demeti yüksek hassasiyetle iş parçası üzerinde gezdirilmelidir. Yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı lazer kaynağının endüstride kullanım alanı gün geçtikçe artmaktadır.

Saç malzemelerin kaynak yapılması işlemi yüksek güçlü lazerin önemli bir uygulamasıdır. 13 kW'lık CO₂ lazer cihazları ile 0.2 inç (5 mm) lazer nüfuz derinliğinde çelik kaynağı yapılabilir. 25 kW'lık CO₂ lazer 1 inç (25 mm)'ye kadar nüfuz derinliğinde çelik kaynağı yapılabilir. Uygulamada genellikle kalınlığı 0.04 – 0.25 inç (0,6-1,2 mm) olan saçlar kaynatılmaktadır. Bu malzemelerin kaynatılma hızı 1-10 metre/dak arasında bulunmaktadır. Pratik olarak kaynak işlemine tabi tutulabilecek en çok saç kalınlığı 2 mm'yi aşmamaktadır.

Lazer ışın demetinin malzemeye nüfuz etme derinliği 25 mm'ye kadar ulaşabilir. Karbon oranı % 0,25'in altında olan çelikleri kaynak etmek kolay, karbon oranı % 0,35'i aşan çelikleri kaynak etmek ise çok zordur.

Genellikle metal olmayan malzemeler, içerdikleri maddelerin lazer ışın demetini az yutmasından dolayı zor kaynak edilirler. Bu malzemelerin kaynak yapılması için en uygun olan Nd:YAG lazerlerdir.

Lazer ile farklı metallerin bir birine kaynak yapılması da mümkündür. Farklı tip metallerin bir birlerine kaynak yapılmasına ait değerlendirme Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Lazer ile saç levhaların kaynak yapılması teknolojisinde aşağıdaki çözülmesi zor olan aşağıdaki problemlerle karşılaşilmektedir.

- Işın demetlerinin iş parçasından yüksek oranda geri yansıması,
- Kaynatılacak parçaların hassas bir şekilde sabitlenmesi,
- İşlem parametrelerinin optimum değerlerinin bulunması,

- İşlem kontrolü ve kaynak kalitesinin izlenmesi,
- Lazer ile kaynatılabilecek saç levhaların özelliklerinin belirlenmesi,
- Lazer ışınlarının ve demet biçimlendirici merceklerin dalga boyu,
- Lazer ışın demetinin gücü,
- Lazer ışın demetinin leke boyutu,
- Lazerin çalışma modu (Sürekli dalga veya Darbeli),
- Lazer ışın demetinin odak uzaklığı ve malzeme içerisindeki odak konumu,
- İş parçasının kimyasal bileşenleri,
- İş parçasının fiziksel özellikleri,
- İş parçasının kalınlığı,
- İş parçasının yüzey durumu,
- Koruyucu gaz tipi: Bileşenleri, akış hızı, basıncı, meme boyutu ve kaynak noktasına nazaran konumu,
- Kaynak karakteristikleri: Kaynak hızı, kaynak geometrisi, parçalar arasındaki boşluk toleransı.

Çizelge 4.5: Metallerin biri birine kaynak edilmesinin değerlendirilmesi

Metaller	Gümüş	Alüminyum	Altın	Berilyum	Kobalt	Bakır	Demir	Magnezyum	Molibden	Nikel	Platin	Renyum	Kalay	Tantal	Titan	Tungsten
Alüminyum	İ															
Altın	M	M														
Berilyum	K	İ	K													
Kobalt	O	K	İ	K												
Bakır	İ	İ	M	K	İ	İ										
Demir	O	K	İ	K	İ	İ	O									
Magnezyum	K	İ	K	K	K	K	O	O								
Molibden	O	K	İ	K	K	O	İ	O								
Nikel	İ	K	M	K	M	M	İ	K	K							
Platin	M	K	M	K	M	M	M	K	İ	M						
Renyum	O	Z	Z	K	M	O	K	Z	K	O	İ					
Kalay	İ	İ	K	O	K	İ	K	K	O	K	K	O				
Tantal	K	K	Z	K	K	O	K	Z	M	K	K	K	K			
Titan	İ	K	K	K	K	K	K	O	M	K	K	K	K	M		
Tungsten	O	K	Z	K	K	O	K	O	M	K	M	K	O	M	İ	
Zirkonyum	K	K	K	K	K	K	K	O	K	K	K	K	K	İ	M	K

Tabloda: M: Mükemmel İ: İyi O: Orta Z: Zor K: Kaynatılamaz

Şekil 4.7’de lazerle kaynak işleminde ışın demetinin malzemeye geçişi için önem arz eden parametreleri içeren akış diyagramı verilmiştir. Lazerle kaynak işlemi gerçekleştirilirken, ya ışın demeti bir noktada sabitlenip iş parçası hareket ettirilir ya da iş parçası sabitlenip ışın demeti iş parçası üzerinde gezdirilir. Bu esnada lazer ışın demetinin malzeme yüzeyine çarpma açısı, sabit tutulmalıdır.

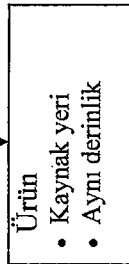
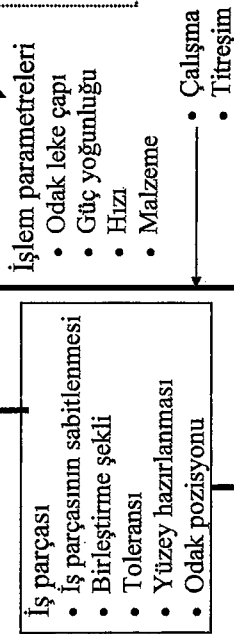
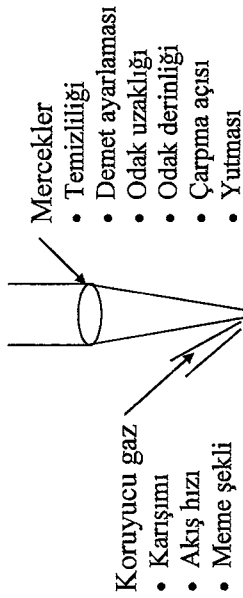
Lazer ile malzeme işleme parametrelerinin tümü dikkate alındığında söz konusu parametrelerden en önemli olanları işlem parametreleri diyebiliriz. İşlem parametreleri ise esas olarak malzemeye çarpan lazer ışın demetinin gücü, lazer demetinin odak çapı $2W_0$, kaynak hızı V ve malzeme tarafından lazerin yutulma oranı A dan oluşur diyebiliriz.

Kaynak bölgesinin derinlik-genişlik oranı, malzeme yapısına bağlı parametrelerdir. Demet şekillendirici mercekler, koruyucu gaz ve birleştirme şekli de kaynak kalitesini belirlemede önemli rol oynayan bağımlı parametrelerdir.



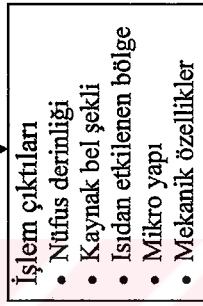
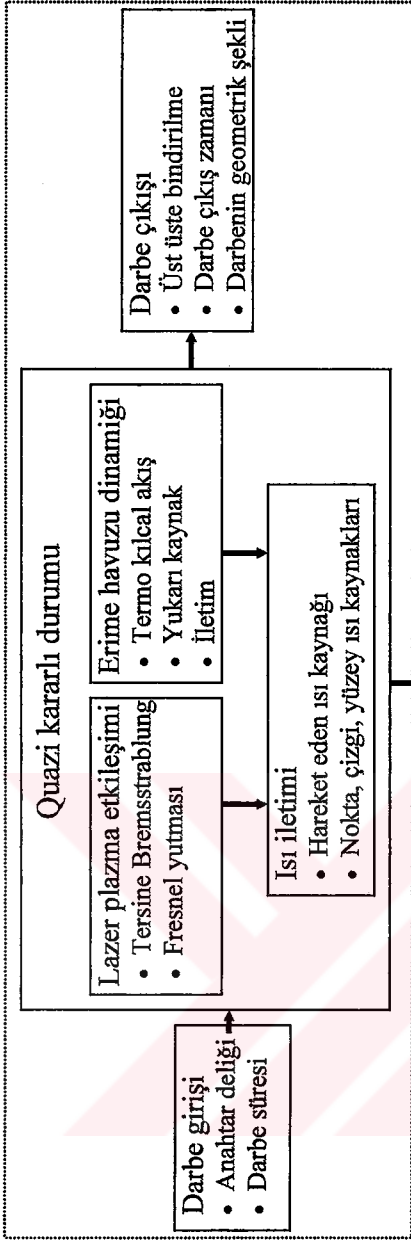
Lazer ışın demeti

- Gücü
- Modu
- Uzaklaşması



Yüksek Kaliteli Kaynak

Kaynak İşlemi



Şekil 4.7: Lazer kaynak işleminin akış şeması

5. KAYNAK İŞLEMİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ İÇİN ÖNEMLİ LAZER PARAMETRELERİ VE TEKNOLOJİK DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

5.1 Lazer Işınının Güç Yoğunluğu

Malzeme üzerinde bir işlem yapmak için lazer cihazının gücünden ziyade malzemeye uygulanan güç yoğunluğu önemlidir (birim alana düşen ışın demet gücü). Lazer ışınlarının uyumluluğu ve ışın demetinin çok küçük bir alanda odaklanabilmesi, çok büyük güç yoğunluğunun elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Kaynak işleminin kaliteli olması için aşağıdaki parametre değerlerinin sabit kalması gerekir (Du 2000).

- Odak leke çapı
- Darbe süresi
- Darbe gücü

Odak leke çapı daire şeklinde olduğunda güç yoğunluğu formül 5.1'den hesaplanır.

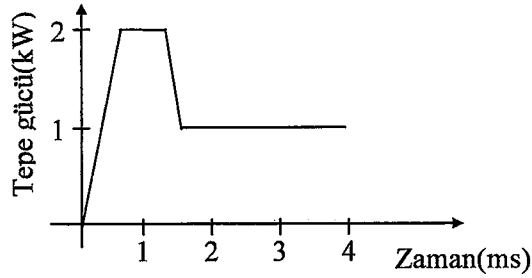
$$P_f = \frac{P}{\pi W_0^2} \quad (5.1)$$

Formülde; P_f : Odak alanındaki güç yoğunluğu, P : Lazer ışın demetinin gücü, W_0 : Odak lekesinin yarı çapıdır.

Derinlemesine nüfuz eden kaynak modu başlangıcında, anahtar deliği (*Key hole*) formunu elde etmek için malzemeye yeterince güç yoğunluğunun uygulanması gerekir. Formül 5.1'de görüldüğü gibi, güç yoğunluğu lazer ışın demetinin gücü ve odak leke çapına bağlıdır. Nüfuz derinliği, güç yoğunluğunun azalması ve ışın demetinin odak leke çapının artması ile azalır. Mevcut lazerler, termik imalat için gerekli olan güç yoğunluklarını sağlayabildikleri için, materyaller üzerinde kesme, dar bölgede eritme ve başka ısı işlemlerin yapılmasını mümkün kılmaktadırlar.

Metal malzemelere lazer ışın demeti uygulamanın ilk anında demetin büyük bir kısmı yansıtılır, çok az bir kısmı ise yutulur. Bu yüzden, yutulan lazer ışın demetinin miktarını artırarak, derinlemesine nüfuz eden kaynak modunda anahtar

deliği formunu elde etmek için, işlemin başlangıcında malzemeyi eritmek için yeterli olacak kadar güç yoğunluğunun gerekir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Anahtar deliği elde etmek için malzemeye uygulanması gereken lazer darbesinin şekli

Gereken güç yoğunluğunu hesaplayabilmek için aşağıdakilerin bilinmesi gerekir;

- Kullanılan dalga boyu için yutma katsayısı,
- Şuallandırma açısı,
- Şuallandırılan yüzeyin durumu.

Malzeme yüzeyinde sıcaklığın kaynama noktasına (T_b) ulaştığında τ_p anında yarı sonsuz cismin eksenli boyunca oluşan erime havuzunun derinliği (h) formül 5.2'den bulunabilir.

$$h_{(cm)} \approx 3.54 / T_m \quad (5.2)$$

Formülde; h : Erime havuzunun derinliği (cm), T_m : Kaynatılacak malzemenin erime noktasıdır ($^{\circ}C$).

Ayrıca lazer ile iletimsel kaynağının kalitesini etkileyen parametrelere gelince, darbeli lazer için ortalama tepe güç formül 5.3'den hesaplanabilir.

$$P_p = \frac{E_p}{\tau_p} \quad (5.3)$$

Formülde; P_p : Ortalama tepe gücü (kW), E_p : Darbe enerjisi (J), τ_p : Darbe süresidir (ms).

Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu ise formül 5.4'den hesaplanabilir.

$$P_d = \frac{P_p}{D} \quad (5.4)$$

Formülde; P_d : Ortalama tepe güç yoğunluğu (kW/mm^2), P_p : Ortalama tepe gücü (kW), D : odak leke alanıdır (mm^2).

Malzemeye uygulanan ortalama güç ise formül 5.5'den hesaplanabilir.

$$P_{avg} = E_p P_{rr} \quad (5.5)$$

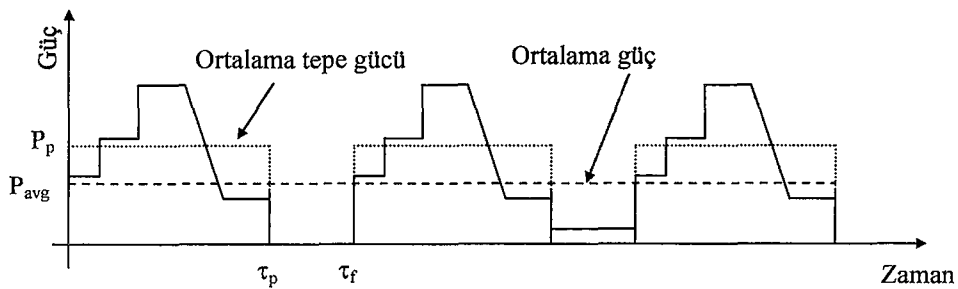
Formülde; P_{avg} : Ortalama lazer gücü (W), E_p : Darbe enerjisi (J), P_{rr} : Darbe tekrarlama oranıdır (PRR , Hz).

Görev saykılı ise formül 5.6'dan hesaplanabilir.

$$C_d = \frac{\tau_p}{\tau_f} \quad (5.6)$$

Formülde; C_d : Görev saykılı, τ_f : iki darbe arasındaki süredir.

Şekil 5.2'de bahsedilen terimlerin temsil ettiği değerler bir lazer darbesi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 5.2: Lazer darbesi şeklinde tanımlanan güçlerin ve sürelerin şematik gösterimi

5.2 Bir Malzemenin Kaynak Yapılması İçin Gereken Kritik Lazer Güç Yoğunluğu

Lazer şualarının malzemede meydana getirdiği sıcaklık, alanı belli olduğunda, verilmiş τ_p zaman aralığında, gereken noktada, lazım olan sıcaklık değerine ulaşmak için gereken güç yoğunluğu belirlenebilir. Mesela, bu yolla malzemede dağılma yapan güç yoğunluğu hesaplanabilir. Burada “Dağılma” denildiğinde malzeme yüzeyinde, normal basınç altında, erime veya kaynama noktasına kadar sıcaklığın artırılması anlaşılmaktadır.

Malzeme yüzeyinde T_m erime sıcaklığına ulaşmak üzere gereken güç yoğunluğunu belirlemek için yarı sonsuz tek boyutlu kitleyi zamana göre sabit olan bir yoğunlukla ısıtma modeli uygulanabilir. Bu modele göre elde edilen formül 5.7 aşağıda verilmiştir (Rykalın ve ark.1978).

$$I_c^{(1)} = \frac{0.885 T_m k}{(x \tau_p)^{1/2}} \quad (5.7)$$

Formülde; k: Malzemenin ısı iletimi, T_m : Erime sıcaklığı, τ_p : Darbe süresi, x: Malzemenin ısı nüfuz katsayısıdır.

Aşağıdaki Çizelge 5.1’de bazı metaller için $I_c^{(1)}$ ’in değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.1: Metallerin lazer şualandırması için kritik güç yoğunlukları

Metal	k, W/(cmK)	$x, cm^2 / s$	$T_m, ^\circ C$	τ_p, s	$I_c^{(1)}, W / cm^2$
Bakır	3.89	1.12	1083	10^{-3} - 10^{-8}	$1,1 \times 10^4$ - 3.5×10^7
Çelik	0.51	0.15	1535	10^{-3} - 10^{-8}	3.5×10^3 - 1.8×10^5
Nikel	0.67	0.18	1453	10^{-3} - 10^{-8}	6.5×10^3 - 2×10^5
Titanyum	0.15	0.06	1800	10^{-3} - 10^{-8}	3×10^3 - 1×10^5
Krom	0.70	0.22	1830	10^{-3} - 10^{-8}	7.7×10^3 - 2.7×10^5
Aliminyum	2.09	0.87	660	10^{-3} - 10^{-8}	4.2×10^3 - 13×10^5

Malzemenin yüzeyinde T_m sıcaklığının oluşması için gereken şualandırma süresinin bulunması amacı ile sabit yoğunluklu ısı kaynağı tarafından yarı sonsuz cismin ısınmasının tek boyutlu modeli uygulanabilir. Söz konusu modelden Formül 5.8 elde edilmiştir (Rykalın ve ark.1978).

$$\tau_p = \frac{0.79 T_m^2 k^2}{I_0^2 x} \quad (5.8)$$

Mesela, bakır için $I_0 = 10^6 \text{ W/cm}^2$ olduğunda, $\tau_p = 10^{-5} \text{ s}$, ve $I_0 = 10^7 \text{ W/cm}^2$ olduğunda $\tau_p = 10^{-7} \text{ s}$ olacaktır.

Benzer şekilde malzemenin yüzeyinde kaynama (T_b) sıcaklığına ulaşmak için gereken güç yoğunluğu da formül 5.9'dan bulunabilir (Rykalın ve ark.1978).

$$I_c^{(1)} = \frac{0.885 T_b k}{(x \tau_p)^{1/2}} \quad (5.9)$$

Malzeme yüzeyinin sıcaklığı T_b değerine ulaştığında, malzeme şiddetle buharlaşır. Mesela, bakır için bu olay $I_c^{(2)} = 2.1 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ şualandırma güç yoğunluğunda meydana gelir.

Formül 5.9'dan lazerle kaynak yapmak için gereken kritik güç yoğunluğu hesaplanabilir. Ancak bir çok durumda erime bölgesinde buharlaşmanın olması istenmeyen bir olaydır. Yani kaynak yapma sıcaklığının bu değerin altında tutulması gerekir.

Aşağıdaki inceleme lazer darbesinin devam ettiği sürece meydana çıkabilecek buharlaşmanın kabul edilebilir bir düzeyde olmasını sağlayan şualandırma gücü yoğunluğunu belirleme probleminin bertaraf edilmesini sağlamaktadır. Yüzeyin ısıtılması sırasında oluşan oylumda aşağıda verilen iki dalga yayılmaktadır (Rykalın ve ark. 1978).

- Termal Dalgalar,
- Buharlaşma Dalgaları.

Güç yoğunluğu düşük olduğunda termal dalgaların hızı buharlaşma dalgalarının hızından çok çok büyük olur. Güç yoğunluğunun artması ile buharlaşma dalgalarının hızı V_v yükselerek belli bir $I_c^{(3)}$ güç yoğunluğunda termal dalgaların hızı V_h 'a eşit olur. Bu şartlar dahilinde kaynak için kritik güç yoğunluğu aşağıdaki şekilde belirlenebilir (5.10).

$$V_h \approx \sqrt{\frac{x}{\tau_p}}; \quad V_v = \frac{I_c^{(3)}}{\rho L_b} \quad (5.10)$$

Burada L_b buharlaşma ısısıdır. Kritik güç yoğunluğunda $V_h = V_v$ olacağı için eşitlik 5.11'in sağlanması gerekir.

$$\sqrt{\frac{x}{\tau_p}} = \frac{I_c^{(3)}}{\rho L_b} \quad (5.11)$$

Bu eşitlikten gereken kritik güç yoğunluğu aşağıdaki gibi belirlenir (5.12).

$$I_c^{(3)} = \rho L_b \sqrt{\frac{x}{\tau_p}} \quad (5.12)$$

Değişik metaller için belirlenmiş olan $I_c^{(3)}$ değerleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Malzemelerin çoğu için $I_c^{(1)} < I_c^{(2)} < I_c^{(3)}$ dir. Malzemenin yüzeyinin ($z=0$) ısınma hızı, formül 5.13'den belirlenir (Rykalın ve ark. 1978).

$$V_h = \frac{I_0}{k} \sqrt{\frac{x}{\pi \tau_p}} \quad (5.13)$$

Çizelge 5.2: Farklı tip metaller için kritik güç yoğunluk ($I_c^{(3)}$) değerleri

Metal	$\rho \cdot L_b,$	$x, cm^2 / s$	τ_p, s	$I_c^{(3)}, W / cm^2$
Bakır	42.88	1.12	$10^{-3}-10^{-8}$	$1.4 \times 10^6 - 4.6 \times 10^8$
Çelik	54.76	0.15	$10^{-3}-10^{-8}$	$6.7 \times 10^5 - 2.1 \times 10^8$
Nikel	55.3	0.18	$10^{-3}-10^{-8}$	$7.5 \times 10^5 - 2.4 \times 10^8$
Titanyum	44.27	0.06	$10^{-3}-10^{-8}$	$3.4 \times 10^5 - 1.1 \times 10^8$
Wolfram	95.43	0.65	$10^{-3}-10^{-8}$	$2.4 \times 10^6 - 7.7 \times 10^8$
Moniblen	69.05	0.55	$10^{-3}-10^{-8}$	$1.6 \times 10^6 - 5.1 \times 10^8$
Krom	54.17	0.22	$10^{-3}-10^{-8}$	$8.4 \times 10^5 - 2.5 \times 10^8$
Alüminyum	28.09	0.87	$10^{-3}-10^{-8}$	$8.6 \times 10^5 - 2.7 \times 10^8$

5.3 Kaynak İşlemi İçin Gereken Odak Çapı Ve Derinliği

Kaynak işlemi son odaklama merceğinin odak noktasında yapılır. Burada, odaklanan ışık demetinin leke çapı çok küçüktür. Merceğin odak noktası ile iş parçası arasındaki mesafe arttıkça ışık demetinin çapı büyür. Sonuçta eriyen külçe miktarı artar ve kaynak derinliği azalır. Odaklama merceğinin iş parçası yüzeyine mümkün olduğunca yakın tutulması gerekir.

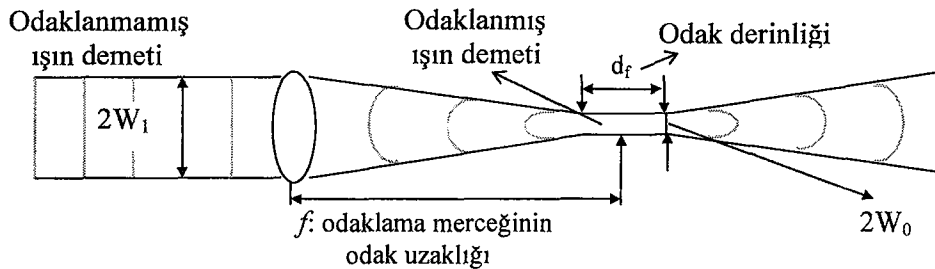
Lazer kaynağı işlemi esnasında iş parçası üzerinde odak noktasında çalışmanın iki avantajı vardır;

- Odak leke çapı küçük olduğu için, ısıdan etkilenen bölge de küçük olur ve bu noktada bazı kaynak testleri kolayca ölçülebilir,
- Odak leke çapı, odaklama merceğinin hafif oynamalarına bile duyarlıdır. Odaklama noktasında çalışmak, odaklama merceğinin hafif oynamaları karşısında odak derinliğinden dolayı odak leke çapının sabit kalmasını sağlar.

Şekil 5.3'te lazer ışın demetinin odaklanma şeması gösterilmiştir. TEM_{00} modunda üretilen ve Gausyen dağılıma sahip olan bir ışın demeti odaklandığında elde edilen odak lekesinin yarı çapı formül 5.14'den hesaplanabilir.

$$W_0 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{f}{W_1} \quad (5.14)$$

Formülde; λ : Lazer ışın demetinin dalga boyu, f : Kullanılan odaklama merceğinin odak uzaklığı, W_1 : Odaklama merceğine çarpan ışının demet yarı çapı, W_0 : Merceğin odak uzaklığında meydana gelen lekenin yarı çapıdır.



Şekil 5.3: $2W_1$ demet çapındaki TEM_{00} modlu lazer ışın demetinin odaklanması

Eğer odaklama için kullanılan merceğin yüzey çapı lazer ışın demetinin çapına yaklaşık olarak eşitse odak yarı çapı formül 5.15'den de hesaplanabilir.

$$W_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D_d} f \quad (5.15)$$

Formülde; D_d : Merceğin yerleştirildiği düzeneğin çapı

Formül 5.14 ve 5.15'den elde edilecek odak leke çapı lazer ışın demetinin dalga boyu ile doğru orantılıdır. Bu sebepten CO₂ lazerlerin odaklama şartları yerine getiremediği durumlarda Nd:YAG veya Nd:Cam lazerler kullanılır.

Kalite değeri $M^2 > 1$ olan lazer demeti düşük kaliteli demet olarak tanımlanır. Pratikte lazer kaynaklarının çoğunda M^2 değeri 1'den büyüktür. Odaklanan lazer ışının demet yarı çapı (W_0); lazer ışınının dalga boyu (λ), lazer ışın demetinin odaklanabilirliği (M^2), merceğin odak uzaklığı (f) ve odaklama merceğinde ışın demetinin yarı çapı (W_1) değerlerine bağlı olarak hesaplanabilir. Bu değerler arasındaki ilişki formül 5.16'da verilmiştir.

$$W_0 = M^2 \frac{4\lambda f}{\pi W_1} \quad (5.16)$$

Odaklanan ışın demetinin odak leke çapı, belirli bir mesafede yaklaşık olarak sabit kalır. Bu mesafeye odak derinliği denir. Materyal işlemede, odak leke çapının iş parçası üzerindeki pozisyonunun çok hassas bir şekilde tayin edilmesi gerekir. Odak derinliği ışın demetinin mod şekline bağlı olarak değişir. Gausyen ışın demeti dağılımındaki odak derinliği, formül 5.17'den hesaplanabilir.

$$d_f = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{T_f^2 - 1} \left(\frac{f}{W_1} \right)^2 \quad (5.17)$$

Formülde; d_f : Odak derinliği, λ : Lazerin dalga boyu, T_f : Tolerans faktörü (1+ % 5), f : Odak uzaklığı, W_1 : Odaklama merceğinde ışın demetinin yarı çapıdır.

Standartlara göre, tolerans faktörü (T_f) odak leke çapının % 10'nundan fazla olamaz. Bu değer genellikle % 5'i geçmez. Formül 5.18 kullanılarak, odak derinliği, odak leke çapından da hesaplanabilir.

$$d_f = \frac{2\pi}{\lambda} W_0^2 \sqrt{T_f^2 - 1} \quad (5.18)$$

Örnek: CO₂ demet yarı çapı $W_1=4\text{mm}$, kullanılan germanyum merceğin odak uzaklığı ise $f=60\text{ mm}$ dir. Işın demetinin leke yarı çapı;

$$W_o = \frac{10,6 \times 10^{-6} \times 60 \times 10^{-3}}{\pi \times 4 \times 10^{-3}} \cong 50 \mu m$$

% 5 değişimdeki odak derinliği ise ($T_f = 1+0,05=1,05$); formül 5.18'den

$$d_f = \frac{2 \times \pi}{10,6 \times 10^{-6}} (50 \times 10^{-6})^2 \sqrt{1,05^2 - 1} \cong 0,49 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Odak çapı 250 mm olacak olursa $d_f \cong 8,5 \text{ mm}$ $W_o \cong 200 \mu m$ olur. Merceğin odak uzaklığı artarken odaklanan ışın demetinin odak leke çapı ve odak derinliği de artmaktadır.

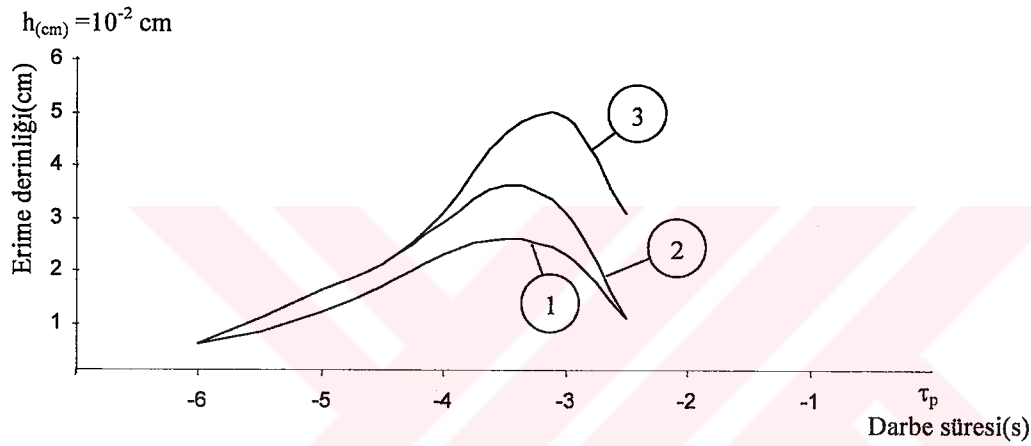
Gausyen olmayan lazer ışın demetinin odak derinliği formül 5.19'dan hesaplanabilir. Odak derinliği, iş parçasının işlem esnasındaki tolerans durumundan hesaplanır.

$$d_f = \sqrt{T_f^2 - 1} \frac{\pi \times W_0^2}{2 \times \lambda \times M^2} \quad (5.19)$$

Örneğin CO₂ lazerde $M^2=7,5$, $f = 200 \text{ mm}$ ve $W_1 = 40 \text{ mm}$ ise denklem 5.16'da $W_0 = 0,51 \text{ mm}$ olarak hesaplanır. Bu değer formül 5.19'da yerine konursa odak leke çapının % 5 değişimi ($T_f = 1+0,05$) için odak derinliği (d_f)=1,65 mm olarak bulunur. Hesaplanan bu değer endüstride kullanılan lazer cihazlarına aittir.

5.3 Malzemelerin Kaynak Yapılması İçin Gereken Lazer Darbesinin Parametreleri

Darbe genişliği; Darbe genişliğinin optimum bandı malzemenin malzemeye değişmektedir. Yüksek darbe enerjileri için darbe genişliği de yüksektir. Her bir sabit darbe enerjisi için en çok erime derinliği sağlayan bir darbe genişliği mevcuttur. Bu olgu Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Bu durumda, çok az darbe genişliği süre olarak, çok büyük darbe genişliği ise yetersiz güç yoğunluğu olarak eritme yetersizliğine sebep olabilir.



Şekil 5.4: Farklı tip metallerin sabit darbe enerjisinde, darbe süresinin logaritmasına bağlı olarak maksimum erime derinlikleri; E=1,5 J; 1-Volfram, 2-Bakır, 3-Alüminyum

Malzemenin buharlaşması için gereken optimum darbe genişliği de benzer şekilde bulunabilir. Eritme esnasında malzeme kaldırmayı önlemek için darbe genişliğinin formül 5.20 ile belirlenen değeri aşmaması gerekir.

$$\tau_{p3} = \frac{10W_0}{x} \quad (5.20)$$

Burada W_0 ışın lekesinin yarı çapıdır ve formül 5.21’den belirlenir.

$$W_0 = \frac{0.02k}{\epsilon_s \sigma_0 T_b^3} \quad (5.21)$$

Formül 5.21’de ε_s : cismin siyahlık derecesi, σ_0 : Stefan-Boltzman sabiti T_b : Malzemenin kaynama sıcaklığıdır. Bütün bunlar dikkate alındığında T_b sıcaklığına ulaşmak için gereken güç yoğunluğu ise formül 5.22’den belirlenir.

$$I_{0\min} \geq \frac{2.44T_b k}{W_0} \quad (5.22)$$

Mesela, bakır için $W_0=10^{-2}$ cm olduğunda, $I_{0\min} = 4.5 \times 10^5 W/cm^2$ bulunur.

Darbe enerjisi; Bu parametre başlıca olarak kaynak sürecinde etki bölgesine verilen toplam enerjini belirler ve diğer parametrelerle (darbe genişliği, darbenin yapısı ve divergensi ile) sıkı bir şekilde ilişkilidir. Bu yüzden bu parametre ayar aracı olarak kullanılır ve bunun için filtrelerden ve diyaframlardan yararlanır.

5.5 Lazer Darbesi Genişliği İle Erime Çukurunun Derinliği Arasındaki İlişki

Bu bağlantı şeklinin belirlenmesi için yüzeyinde Gaussian ısı kaynağı olan yarı sonsuz cisim modeli kullanılacaktır. Bu durumda sıcaklığın OZ eksenine üzere yayılması denklem 5.23 ile belirlenir.

$$T_{ma}(0, z, \tau_i) = \frac{I_0}{4\pi k \sqrt{\pi \cdot x}} \int_0^\tau \frac{\exp(-z^2/(4x\theta)) d\theta}{\sqrt{\theta(\tau_0 + \theta)}} \quad (5.23)$$

Formülde; T_{ma} : Malzeme sıcaklığı, I_0 : Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu, k : Malzemenin ısı iletkenliği, x : Malzemenin ısı yayma katsayısı, τ_p : Darbe süresi, z : Malzeme yüzeyinden derinlik mesafesidir.

5.23 formülüne göre, değerlendirme yapmak için sıcaklığın T_m ’e eşit olduğu var sayılır, z ve τ parametrelerine değişik değerler verilerek integralin değerleri hesaplanır. Maksimum darbe genişliği öyle bir süredir ki, bu süreden sonra darbe enerjisinin artmasıyla erime derinliği artmaz.

5.6 Bir Lazer Darbesinin Taşıdığı Enerji Miktarı ile Malzemede Meydana Gelen Sıcaklık Arasındaki Bağntı

Malzeme yüzeyine τ_p süresince uygulanan darbe enerjisinin malzemede oluşturduğu ısının yayıldığı derinlik (L_p), formül 5.24'den hesaplanabilir.

$$L_p = 2\sqrt{(x\tau_p)} \quad (5.24)$$

Formülde; L_p : Isının yayıldığı derinlik (m), x : Malzemenin ısıl yayma katsayısı (m^2/s), τ_p : Darbe süresidir (s).

Isıtılan bir hacimdeki sıcaklık yükselmesi H_t/mc dir. Buradaki m ısıtılan hacimdeki kütledir ($m = L_p\rho$ ρ :malzemenin yoğunluğudur). Isıtılan kütlede meydana gelen sıcaklık artışı formül 5.25'ten hesaplanabilir.

$$\Delta_T = \frac{I_0\tau_p x}{L_p k} = \frac{I_0}{2k} \sqrt{(\tau_p x)} \quad (5.25)$$

Formülde; Δ_T : Malzemede meydana gelen sıcaklık artışı ($^{\circ}K$), I_0 : Malzemeye uygulanan güç yoğunluğu (W/m^2), τ_p : Darbe süresi (s), x : Malzemenin ısıl yayma katsayısı (m^2/s), L_p : Isının yayıldığı derinlik, k : Isıl iletkenliktir ($W/(mK)$).

Bir malzemenin ısıl iletkenliği, ısıl yayması, yutma katsayısı ve yansıtması malzemenin sıcaklığına bağlıdır. Formülleri basite indirmek için yaklaşık katsayıları hesaplamada Çizelge 5.3 kullanılır.

Çizelge 5.4: Malzeme cinsine göre ilgili malzemeye ait özel sabit katsayılar

Meteryal	Isıl iletkenlik (k) (W/(mK))	Isıl nüfuz(*) (m^2/s)(10^{-6})	Özelısı kapasitesi (C)(J/(kgK))	Yoğunluk (ρ)(kg/m^3)	Erime noktası (T_m)(K)	Kaynama Noktası(T_v)(K)
Aliminyum	238	97.3	903	2710	932	2720
Bakır	400	116.3	385	8960	1356	2855
Demir	82	23.2	449	7870	1810	3160
Yumuşak demir	45	13.6	420	7860	1700	

*300 Kelvindeki değerlerdir. Malzeme sıcaklığı ile bu parametrenin değeri etkin bir şekilde değişmektedir.

5.7 Lazerle Kaynak Kalitesinin Malzeme Parametrelerine Bağlılığı

Metaller, lazer ışığını geçirmezler ve malzeme yüzeyine çarpan ışın demeti yüksek oranda yansır. Lazer ışını, çoğu metal tarafından yansıtıldığı için çarptığı metalin yüzeyine yakın bir bölgede küçük derinlikte ve genişlikte bir çukur açılabilir. Paslanmaz çelik saç lazer ışın demetinin % 98'ini yansır (Nath 2002). Malzeme sıcaklığının artması ile yüzey yansımaları azalır.

Yutma; malzeme tarafından tutulan lazer enerjisinin malzeme yüzeyine çarpan lazer enerjisine oranı olarak belirlenir. Yutma, malzemenin cinsine, yüzey şartlarına, lazer ışınının dalga boyuna ve lazer ışın demetinin malzeme yüzeyine çarpma açısına bağlıdır. Lazer ışınının malzeme tarafından maksimum oranda yutulması, demetin malzeme yüzeyine 90° açı ile çarpmasında meydana gelmektedir. Lazer kaynağında iş parçasına transfer edilen ısı miktarı, bu parça tarafından yutulan enerjiden hesaplanabilir. Malzemenin odak lekesi çapında olan kısmına aktarılacak ısıya dönüşen enerji, malzemede ısı yayılmaya sebep olur. Malzemenin ısı yayma katsayısı formül 5.26'dan hesaplanabilir (Wilson ve ark. 1987).

$$x = \frac{k}{\rho c} \quad (5.26)$$

Formülde; k : Malzemenin ısı iletkenliği (W/(mK)), ρ : Malzemenin yoğunluğu (Kg/m³), c : Malzemenin özgül ısıdır (J/(kgK)).

Materyallerde gözlenmekte olan Frensel yansıtmasının matematik formülü, Sokolov (1967) tarafından verilmiştir (Formül 5.27).

$$R = \frac{(\eta - 1)^2 + k_s^2}{(\eta + 1)^2 + k_s^2} \quad (5.27)$$

Formülde; η : Kırılma indisi ($\eta = \sin\alpha/\sin\beta = \eta_{med}/\eta_{vac} = C_{vac}/C_{med}$), k_s : Sönüm katsayısıdır (Malzeme içinde ışın yoğunluğunun sönümlenmesi).

Kısa dalga boyları ($\lambda < 10$ nm) için ısı iletkenlik (k) ve yansıtma katsayısı (n) yaklaşık olarak birbirine eşit olup formül 5.28'den hesaplanabilir.

$$n \approx k \approx \sqrt{\frac{\mu_r}{2\varepsilon_0\omega\rho_{DC}}} \quad (5.28)$$

Formülde; μ_r : Relatif permabiliti, ε_0 : Uzayın permabitesi, ω : Lazer ışınının açısal hızı ($2\pi\nu/\lambda$), ρ_{DC} : Malzemenin doğru akım direncidir (Ω/m).

Hagen-Rubens uzun dalga boyları ($\lambda > 10 \text{ nm}$) için n ve K katsayıları yaklaşık olarak birbirine eşit olduğunu ve formül 5.29'dan hesaplanabileceğini göstermiştir.

$$n \approx k \approx \sqrt{30\lambda\rho_{dc}} \quad (5.29)$$

Metallerin Frensel yansıması ışın demetinin polarizasyonuna bağlı olarak değişmektedir. Frensel yutması Paralel polarisasyon için formül 5.30'dan, dik polarizasyon için formül 5.31'dan hesaplanabilir (Ready 2002).

$$R_{\parallel} = \frac{(\eta \cos \theta - 1)^2 + (k_s \cos \theta)^2}{(\eta \cos \theta + 1)^2 + (k_s \cos \theta)^2} \quad (5.30)$$

$$R_{\perp} = \frac{(\eta - \cos \theta)^2 + k_s^2}{(\eta + \cos \theta)^2 + k_s^2} \quad (5.31)$$

Toplam yansıtma ise $R=1/2 (R_{\parallel}+R_{\perp})$ den hesaplanır.

Metallerin lazer demetini yutmaları, iletimde bulunan serbest elektronların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Metallerin ısınması, kafes yapıda bulunan serbest elektronların titreşmesi yoluyla olmaktadır. Metallerin sıcaklığı artıkça malzemedeki serbest elektron sayısı ve titreşimi artacağından lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulma miktarı da artmaktadır (Mazumder ve ark. 1995).

Xie (1998) tarafından hesaplanan malzemelerin yutması, formül 5.32'de vermiştir.

$$A = 365,15 \sqrt{\frac{\rho_{DC}}{\lambda}} \quad (5.32)$$

Formül 5.32’de lazer cihazının ürettiği dalga boyunu yerine koyarak CO₂ ($\lambda=10.6\mu\text{m}$), COIL (Chemical Oxygen Iodine Laser, $\lambda=1.315\mu\text{m}$) ve Nd:YAG ($\lambda=1.06\mu\text{m}$) için metallerin yutma değeri yaklaşık olarak hesaplanabilir. Söz konusu lazer cihazlarının ürettiği ışın demetlerini metallerin yutması formül 5.33’den yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$A_{\text{CO}_2} = 112,2\sqrt{\rho_{\text{DC}}} ; \quad A_{\text{COIL}} = 318,43\sqrt{\rho_{\text{DC}}} ; \quad A_{\text{Nd:YAG}} = 354,67\sqrt{\rho_{\text{DC}}} \quad (5.33)$$

Işın demet yoğunluğu 10^6W/cm^2 ’den çok düşük olduğunda, malzemenin yansıtma derecesi (R) Frensel formülü ile belirlenebilir. Lazer demet yoğunluğu 10^6 - 10^7W/cm^2 ’e olduğunda bir çok malzemenin yansıtma derecesi azalmaya başlar.

Denemeler göstermiştir ki, güç yoğunluğu 10^{10}W/cm^2 ’e vardığında yansıtma derecesi Frensel değerinin % 10’na kadar düşer (Basov ve ark. 1977). Çizelge 5.4’de farklı tip malzemelerin lazer ışın demetini oda ve erime sıcaklığında deneysel olarak bulunan yutma miktarları verilmiştir (Xie 1998). Şekil 5.5’de farklı tip malzemelerin değişik tip lazer cihazının ürettiği dalga boylarını malzeme sıcaklığına bağlı olarak yutmaları gösterilmiştir.

Çizelge 5.4: Metallerin oda ve erime sıcaklığında farklı lazer ışın demetlerini yutma değeri(%)

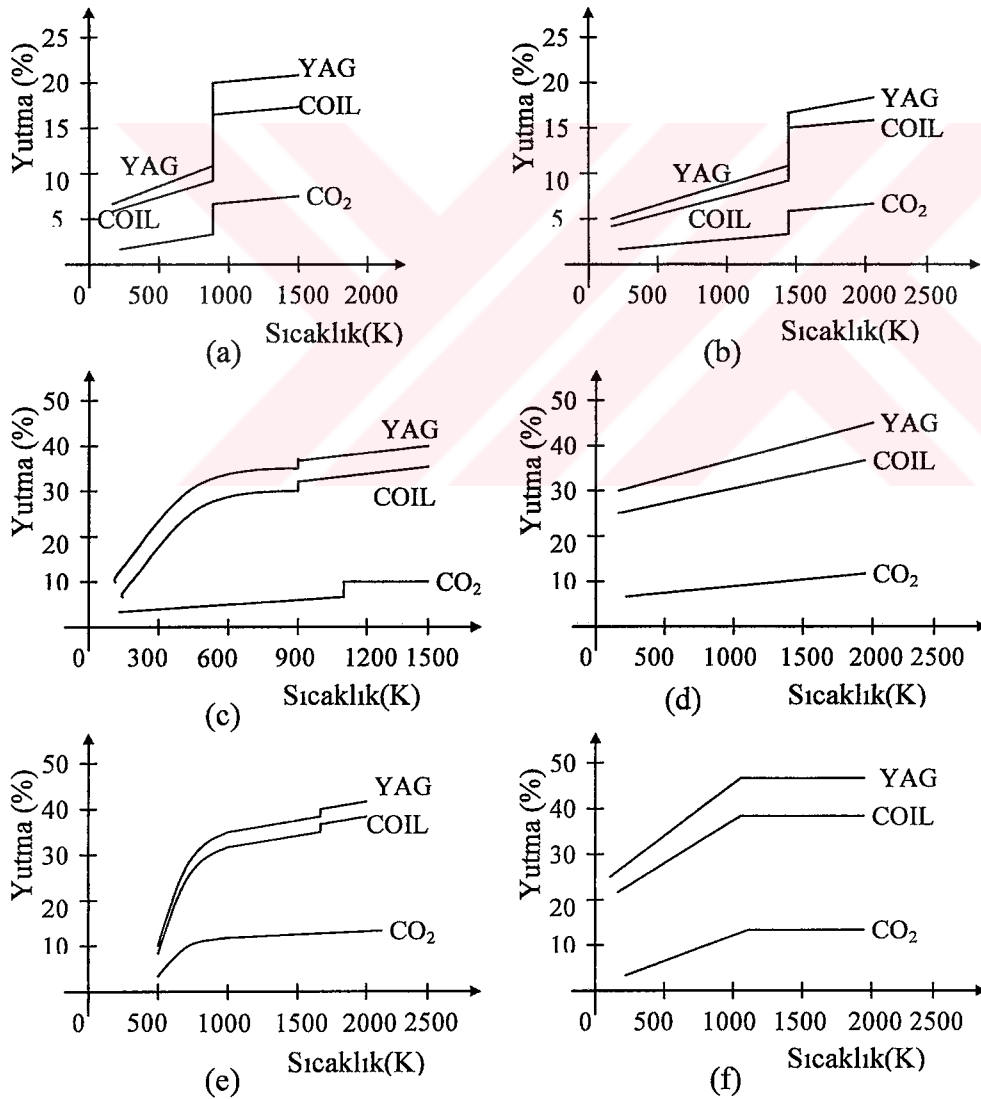
Metal Cinsi	Oda sıcaklığı			Erime sıcaklığı		
	CO ₂	COIL	Nd:YAG	CO ₂	COIL	Nd:YAG
Aliminyum	1,86	5,28	5,88	6,4	18,2	20,2
Bakır	1,55	4,39	4,89	5,1	14,5	16,1
Demir	3,07	8,72	9,71	13,0	36,9	41,1
Nikel	4,70	13,36	14,88	10,3	29,2	32,6
Titan	8,13	23,07	25,70	13,7	38,9	43,3
Karbon çeliği	2,75	7,80	8,69	12,1	34,1	38,2
Paslanmaz çelik	9,72	27,57	30,72	14,0	39,7	44,2

Belli bir süre uygulanan bir lazer darbesinin tek boyutta malzemeye nüfuz etme derinliği Formül 5.34’den hesaplanabilir.(Wilson ve ark. 1987).

$$d_h = 2\sqrt{x\tau_p} \quad (5.34)$$

Formülde; x : Malzemenin ısıl yayma katsayısı (m^2/s), τ_p : Darbe süresi (s), d_h : Malzemeye nüfuz derinliği (Malzeme yüzey sıcaklığının % 37'si sıcaklığa ulaşılan derinlik).

Formül 5.34'den bir lazer ışın darbesi süresinde lazer ışın demetinin malzemeye nüfuz etme derinliği tahmin edilebilir. Bu formülden de anlaşıldığı gibi lazer darbesinin süresi arttıkça lazer ışın demetinin malzemeye nüfuz etme derinliği de ($t^{1/2}$ ile orantılı olarak) artmaktadır. Mesala; darbe süresi 1 ms olan Nd:YAG lazer ışınının malzemeye nüfuz etme derinliği $0.1\mu m$ iken, Q anahtarlamaıyla darbe süresi 100ns yapıldığında nüfuz derinliği $1\mu m$ olarak ölçülmüştür (Chen 1996).



Şekil 5.5: CO₂, COIL ve Nd:YAG lazer demetinin a)Alüminyum, b) Bakır, c)Karbon Çeliği, d)Paslanmaz çelik, e) Demir, f)Titanyum, tarafından yutulması

5.8 Lazer Işının Metaller Tarafından Yutulmasını Etkileyen Faktörler

Yutma oranı, aynı zamanda sıcaklık ve yüzey şartlarına da bağlıdır. Çizelge 5.5’de gösterildiği gibi bu oran, metallerin oksitli bölgelerinde çok daha yüksek olur (Grigoryants 1994). Çizelge 5.5’de, örnek olarak, bazı metallerin 10,6 μm dalga boyundaki ışınları yutma katsayıları gösterilmiştir.

Çizelge 5.5: Bazı metallerin 10,6 μm dalga boyundaki lazer ışın demetini yutması(Grigoryants 1994)

Metal	Yutma	
	Oksitlenmemiş yüzey	Oksitlenmiş yüzey
Altın	0.010	-
Alüminyum	0.034	0.25-0.50
Demir	0.050	0.33-0.74
Zirkonyum	0.083	0.45-0.56
Titan	0.094	0.18-0.25

Üzerinde kaynak işlemi yapılacak olan metallerin yutma ve termal nitelikleri ve bunlar arasındaki ilişkilere bağlı olarak CO₂, COIL ve Nd:YAG lazerlerden biri tercih edilir. Metallerde malzeme sıcaklığına bağlı olarak malzemenin yutma katsayısı da değişmektedir. Çizelge 5.6’da Nd:YAG ve CO₂ lazerler için değişik malzemelere ait yutma katsayıları verilmiştir. Malzeme sıcaklığının artırılması ile yutma katsayısı COIL ve Nd:YAG lazerlerde 2.84, CO₂ lazerlerde ise 3.16 kere daha fazla olabilmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü ve paslılık yutmayı önemli derecede etkilemektedir. CO₂ lazer tarafından üretilen ve çelik sac malzeme yüzeyine ulaşan ışınların yansıtılması malzemenin paslılığına göre % 65 – 80’den % 30- 40’a varan oranlarda değişmektedir. Lazer kaynağı ile birleştirilen metallerin kaynatılan bölgelerinin dayanımı kaynatılmak için kullanılan malzemenin dayanımından daha fazla olduğunu denemeler göstermiştir (Grigoryants 1994). Örneğin, yüzeyi paslı olarak kaynatılan metallerdeki oksijen konsantrasyonu; oksitsiz örnek numunelerdekinden daha fazla bulunmuştur ve kaynatılan malzemelerin sertliğinin azalmasına sebep olduğu gösterilmiştir. Bu yeni teknik lazer kaynağından faydalanılarak minimum

kaynak sertliği elde edilmektedir. Kaynatılacak iki sac levha arasına demir tozu ilave edildiğinde kaynatılan metallerin içerdği oksijen azalırken sertliği artmaktadır.

Çizelge 5.6: Oda sıcaklığında değişik metallerin yutma katsayıları

Metal	Lazer tipi	
	Nd:YAG (1064 nm)	CO ₂ (10,6 µm)
Alüminyum	0,08	0,019
Bakır	0,10	0,015
Altın	-	0,017
Demir	-	0,035
Kurşun	0,16	0,045
Moniblen	0,40	0,027
Nikel	0,26	0,03
Platin	0,11	0,036
Gümüş	0,04	0,014
Tantal	0,18	0,044
Kalay	0,19	0,034
Titan	0,42	0,080
Tungsten	0,41	0,026
Çinko	0,16	0,027

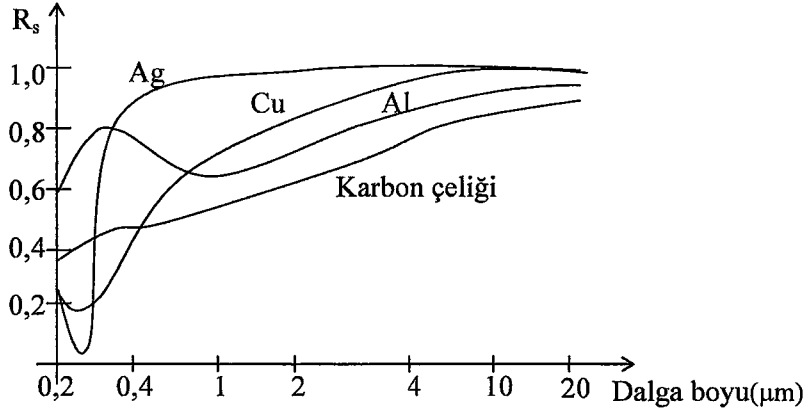
Sac levhaların oda sıcaklığında soğuk olarak çekilmelerinden dolayı yüzeyleri çok düzgündür, üzerlerinde film tabakası ve oksit bulunmaz. Lazer demetinin sabit bir güç yoğunluğunda yüzeyi düzgün olan bir malzemeye çarptığını farz edelim. Malzeme yüzeyine çarpan ışın demetinin ne kadarının malzemeye nüfuz ettiğini formül 5.35'den hesaplanabilir (Ready 2002).

$$I_A = I_0 (1 - R_s) \quad (5.35)$$

Formülde; I_A : Malzeme tarafından yutulan güç yoğunluğu, I_0 : Lazer ışınının güç yoğunluğu, R_s : Malzeme yüzeyinin yansıtma katsayısıdır.

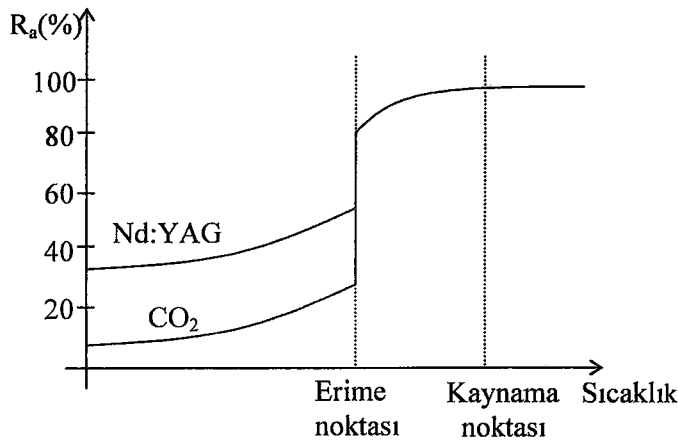
Dalga boyuna bağlı olarak metallerin yansıtma katsayısı Şekil 5.6'de verilmiştir. Görüldüğü gibi, malzemeye uygulanan dalga boyu arttıkça malzeme yüzeyinin yansıtma katsayısı artmakta, yutma katsayısı ise azalmaktadır. Bu durum, kısa dalga boyunda lazer kullanmanın daha avantajlı olduğunu göstermektedir. Ne var ki malzeme yüzeyinin yansıtma katsayısı R_s , malzemenin sıcaklığına bağlı olarak

Şekil 5.7'deki gibi değişmekte olup malzeme yüzey sıcaklığı arttıkça azalmakta ve sonuç olarak malzeme tarafından yutulan $(1-R_s)$ ışın miktarı artmaktadır.



Şekil 5.6: Yüzeyleri parlatılmış çeşitli metallerin farklı dalga boylarında yansıtma katsayılarının değişimi(Ready J.F.,1997)

Malzeme yüzeyinde erime, buharlaşma ve hatta küçük bir tahrip bile kaynak için kısa dalga bir lazer kullanmanın avantajını önemli bir ölçüde azaltmaktadır. Nd:YAG ve CO₂ lazerlerinin ürettiği dalga boylarındaki ışığın metal yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak yutulma katsayılarının değişimi Şekil 5.8'de gösterilmektedir. Malzemelerin erime noktasının yakınlığında, ışığın yutulma katsayıları arasında pratik olarak bir fark kalmamaktadır.



Şekil 5.7: Bir metal yüzeyinin($Z=0$) YAG veya CO₂ lazer dalga dalgalarını yutma katsayısının metalin sıcaklığına bağlı olarak değişiminin şematik gösterimi

5.8.1 İletimsel Lazer Kaynakta Malzemelerin Lazer Demetini Yutma Oranı

Bilindiği gibi iletimsel lazer kaynağın verimi, lazer enerjisinin iş parçası tarafından yutulmasına bağlıdır. Çünkü yalnızca lazer demetinin iş parçası tarafından yutulan kısmı kaynak için yararlı olur. Kaynak kılavuzu açılarak yapılan lazer kaynağında yutma, büyük bir değere ulaşır. Fakat kaynak çukurundaki çok yönlü yansımalar ince metal saçların kaynak yapılması için uygun olmamaktadır.

304 paslanmaz çeliğin kaynak yapılması esnasında lazer enerjisinin malzemeye transfer edilme katsayısı 0.29'dan 0.86'ya kadar değişmektedir. Deneyler göstermiştir ki, minimum kaynak hızında ulaşılması mümkün olan derinliğin maksimum kaynak hızına nispeten 0.13 mm çok olduğu gözlenmiştir (Fuerschbach 1995). Anahtar deliği kaynak modu iletim kaynağı modu ile değiştirildiğinde kaynak hızı artar.

Malzemelerin lazer demetini yutma katsayılarını belirlemenin en iyi şekli, deney yoludur (Duley 1985). Duley (1985), sürekli dalga CO₂ lazer ile oda sıcaklığında paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin yutmasını deneysel olarak ölçmüştür. Çizelge 5.7'de CO₂ ve Nd:YAG lazer ışınlarının farklı malzemeler tarafından yutulma oranının teorik olarak hesaplanan ve deney sonucu ölçülen değerleri verilmiştir (Duley 1985).

Çizelge 5.7: CO₂ ve Nd:YAG lazer ışınının farklı malzemeler tarafından yutulma oranı

Metal	CO ₂		Nd:YAG	
	Ölçülen (%) (Duley 1985)	Hesaplanan (%) (Johnson ve ark. 1975)	Ölçülen (%) (Duley 1985)	Hesaplanan (%) (Johnson ve ark. 1975)
Demir(Fe)	2.3 5.3(500 °C)	2.9 5.3(500 °C)		36 32 (1400 °C)
Titan (Ti)	23	8		39
Zirkonyum(Zr)	15			
Bakır(Cu)		1.5	1.5 6.7(Sıvı)	2.9 3.7(150°C)
Alüminyum(Al)		1.9	5.6 22(Sıvı)	
Moniblen (Mo)	5	2.7		
Tantal(Ta)	10	4.4		
Paslanmaz çelik (SS 304)	10 14(1000 °C)	10 14(1000 °C)		
Ti-6Al-4V	13 14(400 °C)	13 14(400 °C)		

5.8.2 Anahtar Deliği Yöntemi Kaynağında Malzemelerin Lazeri Yutma Oranı

Anahtar deliği yöntemi kaynağında yönteminde önce malzemenin bulunduğu sıcaklıkta yutma oranı dikkate alınarak ilk anda malzemeye uygulanacak enerji değeri bulunur. Anahtar deliği oluştuğunda ise malzemeler gelen ışın demetinin % 98'ini yuttuğu göz önüne alınarak malzemeyi kaynama noktasına ulaştıracak bir enerji uygulanır.

5.9 Malzemeyi Lazerle İşleme Teorisi

Eğer işlenecek malzemeye uygun lazer seçimi yapılmazsa malzemeye çarpan lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulan kısmı gerçekleştirilmek istenen işlem için yetersiz kalabilir. Malzemenin dalga boyuna ait yutma grafiğinden faydalanılarak söz konusu malzeme için uygun lazer seçimi yapılabilir. Malzeme işlemede, materyalin ısı iletkenliği ve ısı kapasitesi önemli parametrelerdir. Çünkü, malzemenin kalınlığı ve ısı iletkenliğinin değeri yükseldikçe lazer ile işlenmesi de zorlaşır.

5.9.1 Lazer Darbe Süresinin Belirlenmesi

Kaynak işlemini gerçekleştirmek için materyale uygulanacak olan lazer darbesinin süresi malzemenin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Değişik malzemeler için bu sürenin sınırları Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.8: Metale bağlı olarak darbe süresinin değişmesi (Ready 2002)

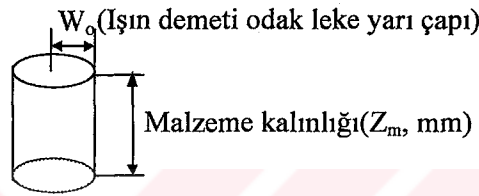
Malzeme	Optimum darbe genişliği(s)
Bakır	$10^{-4} < \tau_p < 5 \times 10^{-4}$
Alüminyum	$5 \times 10^{-4} < \tau_p < 2 \times 10^{-3}$
Çelik	$5 \times 10^{-3} < \tau_p < 8 \times 10^{-3}$

Genişliği gösterilen sınırlar içerisinde seçilmiş, gücü formül 5.39 ile hesaplanmış olan darbenin gücü arttıkça erime derinliği de artmaktadır. Hatırlatalım

ki, Darbe genişliğini azaltmak ve enerji yoğunluğunu yükseltmek yolu ile erime çukurunun derinliğini artırmak bir sonuç vermez, yalnız malzemenin buharlaşması hızlandırılabilir.

5.9.2 Lazer Darbe Gücünün Ve Enerjisinin Belirlenmesi

Şekil 5.8’de gösterilen malzemenin odak leke çapındaki silindirik bir kısmının (erime silindirinin) eritilmesi için gereken enerji ve güç miktarının aşağıdaki gibi hesaplanabilir (5.36).



Şekil 5.8: Odak leke çapındaki malzemenin silindirik modeli

i) Eriyecek olan malzemenin kütlesi ;

$$m_f = \rho Z_m \pi W_0^2 \quad (5.36)$$

Formülde; m_f : Odak leke alanındaki eriyecek malzemenin kütlesi (g), ρ : Materyalin yoğunluğu (g/mm^3), Z_m : Malzemenin kalınlığı (mm), W_0 : Odak lekesinin yarı çapıdır (mm).

ii) Kütlesi m_f olan silindirik kısmın erime noktasına ulaşması için yutması gereken enerji (formül 5.37);

$$Q = T_m m_f c \quad (5.37)$$

Formülde; Q : Malzemenin yutması gereken enerji miktarı (Kalori), T_m : Malzemenin erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), c : Maddenin özgül ısısı (Kalori/g) dir.

iii) Kütlesi m olan silindirik kısmın erime noktasına ulaştırılması için malzemeye uygulanması gereken enerji (5.38) ve güç (5.39) ;

$$E_p = \frac{4,2Q}{A} \quad (5.38)$$

$$P_p = \frac{E_p}{\tau_p} \quad (5.39)$$

Burada; A : malzemenin yutma katsayısı, E_p :Lazer darbesinin enerjisi (J) τ_p : darbe süresidir.

Metal alaşımlarının büyük bir kısmının erime noktası $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ila $8545,78^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Malzemenin erime sıcaklığı yerine buharlaşma sıcaklığı seçilecek olursa, meydana gelen ısı, malzeme içerisinde yayılmaya fırsat bulamadan erime silindiri buharlaştıracaktır. Bu durumda kaynak işlemi yerine malzemenin kesilmesi söz konusu olacaktır.

5.10 Lazer Gücü Ve Kaynak Hızı Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

Lazer gücü ve kaynak hızı arasındaki ilişkinin tahmini değerinin hesaplanmasında lazer kaynağı için geçerli olan boyutsuz parametreler kullanılır (Steen 1998). Normalleştirilmiş güç ve hız olmak üzere boyutsuz olan iki parametre kullanılmaktadır. Bunlar uygun olarak formül 5.40 ve 5.41 ile belirlenmektedirler.

$$X = \frac{PA}{Z_m} kT_m \quad (5.40)$$

$$Y = \frac{VZ_{\max}}{x} \quad (5.41)$$

Bu formüllerde ; X : normalleştirilmiş güç, P : Malzemeye uygulanan lazer gücü, A : Malzemenin yutma katsayısı, Z_m : Metal sacın kalınlığı, k : ısıl iletim katsayısı, T_m : Metalin erime sıcaklığı, Y : normalleştirilmiş hız, V : Kaynak hızı, $Z_{\max}$: Kaynak derinliği, x : Isıl nüfuz katsayısıdır.

Yüksek kaynak hızları için X ve Y parametreleri arasındaki ilişki formül 5.42 ile ifade edilmektedir (Steen 1998).

$$Y = 0,483X \quad (5.42)$$

Düşük kaynak hızlarında ise söz konusu parametreler arasındaki ilişki formül 5.43'de verildiği gibidir.

$$\frac{6,3}{X} = \ln\left(\frac{4,5}{Y}\right) \quad (5.43)$$

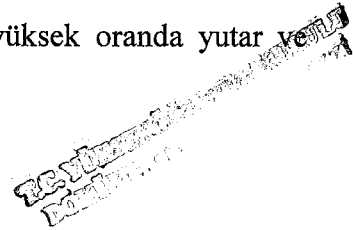
Lazer güç eşleştirme verimi, paslanmaz çelik sac levhaların lazerle iletimsel kaynak durumunda % 15-17 arasındadır ve bu değer, paslanmaz çelik malzemenin lazer ışın demetini yutma değerine (% 14) çok yakındır (Xie ve ark. 1997).

Anahtar deliği yöntemi kaynağında lazer güç eşleştirmesi % 65 olup oldukça yüksek sayılmaktadır. Düşük hızda iletim kaynağı ile kaynak işlemini gerçekleştirmeye nazaran yüksek hızlarda gerçekleştirilen anahtar deliği kaynağı işleminde enerji kayıpları oldukça düşüktür.

İletim lazer kaynağı modunda lazer güç eşleştirme verimini artırmak için yüzeyin ön oksitlendirilmesi ve dolgu malzemesi tozlarının kullanılması önerilmiştir (Xie ve ark.1997). Lazer ışın demetinin malzeme tarafından yutulması ön oksitlendirme veya kimyasal korozyon ile % 30, kaynak bölgesinde uygun dolgu malzemesi kullanarak % 50 artmaktadır (Nath 2002).

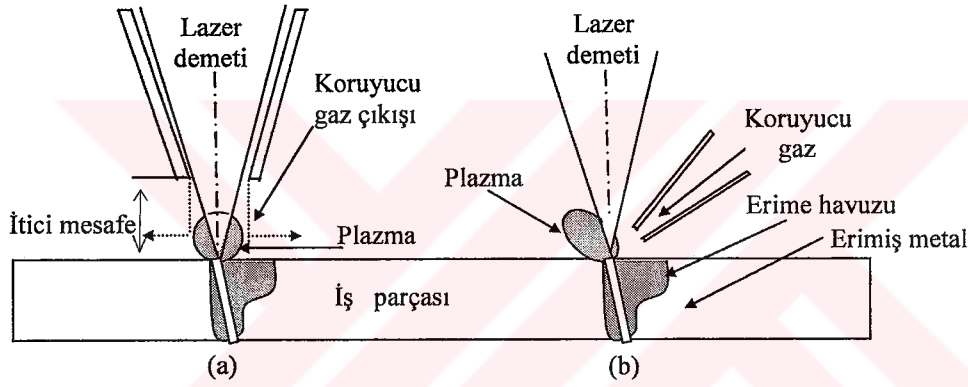
5.11 Lazer Kaynağı Sırasında Metalin Oksitlenmeden Korunması

Lazer kaynağında kullanılan koruyucu gazın iki önemli rolü vardır. Birisi oksitlenme ve atmosferik kirlenmeye karşı kaynak bölgesini korumak, diğeri ise anahtar deliği üzerinde oluşan plazma teşekkülünü bastırarak kaynakta meydana gelebilecek şekil bozukluklarını önlemek veya hiç değilse azaltmaktır. Metallerde kaynak esnasında oluşan oksitlenme, lazer ışın demetini yüksek oranda yutar ve kaynak bölgesinde renk değişikliği meydana getirir.

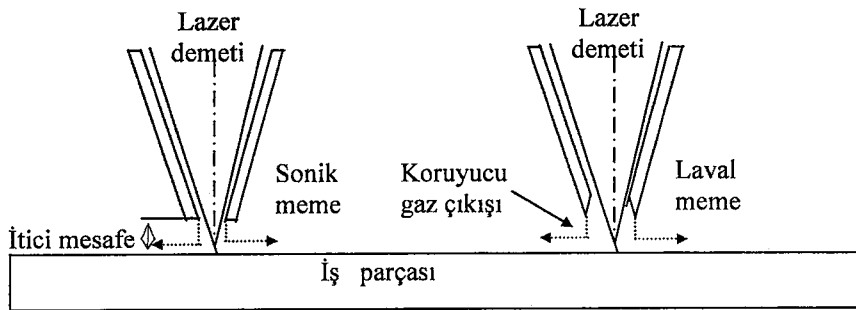


Kaynak bölgesine gaz Şekil 5.9'da gösterilen şekillerde yönlendirilebilir. Şekil 5.9(a)'da gösterilen koruyucu gaz destekleyici memede, kaynak esnasında lazer ışınının bir kısmı plazma tarafından yutulur. Şekil 5.9(b)'de ise eksen dışı gaz memesinde ise, plazmanın malzeme yüzeyinden uzaklaştırılması ile plazmada yutulan lazer demetinin oranı azalır. Şekil 5.9(a)'da gösterilen koruyucu destekli gaz memesi lazer ışın demetini taşıyan muhafazanın kenarlarına Şekil 5.10'da gösterildiği gibi yerleştirilebilir ve iki tipi mevcuttur (Ready 2002);

- Sonik meme şekli,
- Laval meme şekli.



Şekil 5.9: Koruyucu gazın iş parçasına yönlendirilme şekilleri
a) Koruyucu destekli gaz memesi b) Eksen dışı gaz memesi



Şekil 5.10: Koruyucu gaz meme tipleri ve iş parçasına yönlendirilmesi

Sonik ve laval meme şekli arasındaki fark memeden çıkan gazın akış şeklini değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Sonik meme tipinde gazın aktığı alan küçük olduğu için, malzeme yüzeyine daha fazla basınç uygulanmasına sebep olacaktır. Bu tip memeler malzemelerin kesilmesinde kullanılır. Laval meme şeklinde gazın aktığı alan geniş olduğu için eriyen malzemenin yüzeyde yayılmasına sebep olur.

Lazer kaynağı esnasında ortaya çıkan plazma, lazer ışın demetinin yutulmasına ve etrafa saçılmasına dolayısıyla iş parçasına uygulanan güç yoğunluğunun azalmasına neden olur. Güç yoğunluğunun azalması, ışın demetinin nüfuz derinliğinin azalmasına ve sonuçta kaynak şeklinin bozulmasına sebep olur. Söz konusu etkiyi bertaraf etmek için lazerin tepe gücünü artırmak gerekir. Bu da işlem veriminin azalmasına sebep olur.

Koruyucu gaz kullanmak kaynak yüzeyinde meydana gelen metal buharlaşmasını uzaklaştırarak odaklama lensi üzerinde metal buharının oluşturacağı kirlenmeyi de önler.

Yüksek kaynak hızlarına ulaşmak içinde koruyucu gaz kullanılır. Hafif gazlar anahtar deliği üzerinde oluşan plazma alevinin dağıtılmasında daha az etkilidir. Bu sebeple ağır ve hafif gazların karıştırılarak kullanılması daha iyi bir sonuç verir. Kaynak işleminde, koruyucu gaz olarak Argon gazı kullanıldığında, gaz akış memesinin şekli ve gaz akış oranı kritik parametrelerdir. Metal işleme kullanılan gazların tipik özellikleri Çizelge 5.9’da, Çizelge 5.10’da ise lazer cihazlarına uygun olarak kullanılacak gazlar ve tüketim oranları verilmiştir. Eriyen metalin üzerine memeden fazla miktarda Argon gazı verilecek olursa yeterince plazma zamanında oluşamaz. Gaz akış oranının artırılması malzemeye uygulanan güç yoğunluğunun da artırılmasını gerektirir.

Eriyen malzemenin oksitlenmesini (koruyucu gaz) Helyum gazı Nitrojen gazından daha iyi önler. Yaygın olarak kullanılan koruyucu gazlar Helyum, Argon ve Nitrojendir. Orta ve düşük güçlü lazerlerin kullanıldığı kaynak işleminde koruyucu gaz olarak Argon kullanılır. Yaygın olarak kullanılan, koruyucu gaz karışımları, Argon veya Helyum gazının CO₂ gazı ile karıştırılmasıdır (Abbott ve ark. 1994). Argon gazı Helyum gazından ucuzdur, fakat yüksek güçlü lazer darbe demetlerinde

iyonize olur. Yüksek darbe gücüne sahip lazer kaynak cihazlarında Helyum veya Helyum ile birlikte Argon gazı karıştırılarak kullanılır.

Çizelge 5.9: Lazer kaynak işleminde kullanılan koruyucu gazların özellikleri

Gaz	Yoğunluk (kg/m ³)	İyonizasyon potansiyeli(eV)	Isıl iletkenlik (10 ⁻⁴ W/mK)
Argon	1,650	15,7	161,0
Karbon dioksit	1,1833	14,4	157,0
Helyum	0,165	24,5	1482,0
Hidrojen	0,0834		174
Nitrojen	1,153	15,5	250
Oksijen	1,326	13,2	2,39

Çizelge 5.10: Lazer kaynak işleminde kullanılan koruyucu gazlar ve tüketim hızları

Gaz tipi	Koruyucu destekli meme		Eksen dışı jet meme	
	CO ₂	Nd:YAG	Nd:YAG	CO ₂
Helyum veya yüksek oranda Helyum içeren gazlar	10-30 litre/dakika	10-30 litre/dakika	10-40 litre/dakika	10-30 litre/dakika
Argon veya yüksek oranda Argon içeren gazlar	Uygun değil	5-20 litre/dakika	20-40 litre/dakika	5-20 litre/dakika

5.12 Metal Saçların Birleştirilme Bölgelerine Karşı Talepler

Alın kaynağında metal saçların kaynatılacağı bölgedeki kabul edilebilir boşluk, malzeme kalınlığının %10'u kadardır. 0.5 mm'den kalın olan malzemelerde en iyi kalitede kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir (Salminen ve ark. 1995). Malzemelerin birleştirme yüzeylerinin zayıf olması ilave ve pahalı yatırımlar yaparak sabitletmesini gerektirir (Rossler ve ark. 1996). Pahalı sabitleyiciler kullanmak yerine malzemeler arasındaki boşluğu kapatarak kaynak kalitesini artırmak için

malzemelerdeki boşluk bölgelerine doldurma malzemeleri ilave edilerek (metal tozu) kaynak kalitesinin malzeme boyunca sabit kalması sağlanabilir.

5.13 Çelik Malzemelerin Lazer İle Kaynatılabilirliği

Bir çeliğin kaynatılabilirliği, karbon eşitliği CE tarafından belirlenir. CE deneysel olarak ölçülebilen çeliğin sertlik değeridir. CE'nin değeri, çeliği oluşturan karışımların fonksiyonu olarak formül 5.44'de gösterildiği gibi belirlenir (Havrilla 1995).

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Ni}{20} + \frac{\%Cr}{10} + \frac{\%Cu}{40} - \frac{\%Mo}{50} - \frac{\%V}{10} \quad (5.44)$$

CE değeri % 0,3'ü aştığında kaynak sertliği artar ve kaynak edilen malzemede çatal çatlak hataları olabilir. Yüksek karbon çeliklerinin düşük karbon çeliklerine kaynatılabilirlikleri nispeten çok iyidir. Düşük karbon çelikleri kaynatılırken dolgu malzemesi olarak yüksek karbon çelikleri kullanılarak kaynak bölgesindeki CE değeri düşük tutulabilir. Tamamen saflaştırılmış (oksijen içermeyen) veya yarı saflaştırılmış çelikler lazer kaynağı için daha uygun malzemelerdir.

5.14 Lazer-Malzeme Etkileşimi Ve İşlem Modellemesi

Lazer kaynağı işleminin lazer güç çevrim kısmı üç kademeye bölünebilir. İlk kademede, malzeme yüzeyine çarpan lazer ışın demeti yüksek oranda yansıtıldığından, anahtar deliğini oluşturmak için uygulanan ışın demet gücünün yüksek olması gerekir. Tipik olarak, lazer ışın demetinin gücü, 0,5 – 1,5 s içinde anahtar deliği oluşturulacak değere ulaştırılır. Anahtar deliği oluşmaya başladıktan sonra yavaş yavaş ışın demet gücünü aşırı kaynatmadan normal kaynatma değerine düşürmek gerekir. İkinci kademede, ışın demet gücü, önce normal kaynatma

değerine düşürülür ve kaynak işlemi boyunca söz konusu değer sabit tutulur. Üçüncü kademe ise, lazer gücünün kesilmesini kapsar. Kaynak işlemi bittiğinde, malzemeye uygulanan güç ani olarak kesilmeyip yavaş yavaş azaltılarak kesilir. Dairesel alın kaynağı işleminde gücün azaltılması tam 360°'lik açı tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmelidir. Kaynak işleminin bitirilmesinde ışıın demet gücünün kesilmesi yapılan işe bağlı olarak değişir.

5.15 İşlem Kontrolü Ve Kaynak Kalitesinin İzlenmesi

Üretimde, metal saçların yüzeyleri değişik şekillerde kaynak yapılması gerekebilir. Genellikle saç malzemelerin köşeleri belli toleransta kaynak yapılması istenir. Söz konusu işlem, yüksek doğruluklu cihazlar ile lazer kaynağı oluşumunun izlenmesiyle gerçekleştirilmeye çalışılır. Buna ilaveten kaynak kalitesinin de eş zaman güdümlü olarak izlenmesi gerekir. Kaynak kalitesini izlemek için kontrol edilecek parametreler aşağıda belirtilen şekilde iki önemli alt sınıfa ayrılabilir;

- Birinci dereceden izlenmesi gereken parametreler,
- İkinci dereceden izlenmesi gereken parametreler.

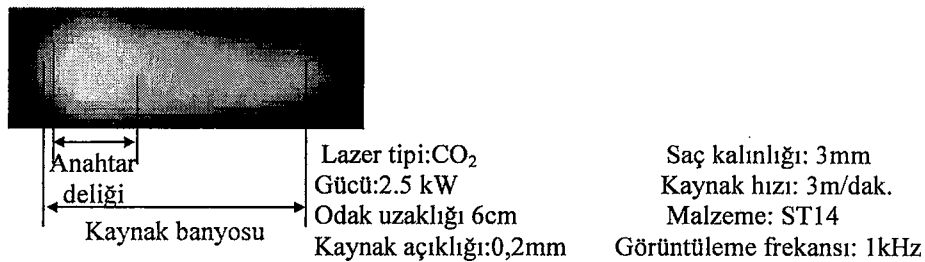
Gereken kalitede kaynak işlemini gerçekleştirmek için, birinci dereceden izlenmesi gereken parametreler mutlaka izlenmelidir. Birinci dereceden izlenmesi gereken parametreler, kaynak hızı ve koruyucu/destekleyici gaz akış oranıdır. Eğer elde edilen kaynak kalitesinden emin olmak istenirse o zaman ikinci dereceden izlenmesi gereken parametrelerin de izlenmesi gerekir. İkinci dereceden izlenmesi gereken parametreler ise akustik emisyon, plazma emisyonu, kaynak çukuru osilasyon frekansı ve metal buharların optik emisyonu (Beersiek ve ark.1997) dur. İkinci dereceden izlenmesi gereken parametrelerin çoğu ancak laboratuvar ortamında uygulanabildiği için çok az bir kısmı endüstriyel üretimde uygulamaya konmuştur.

Kaynak işleminin birebir izlenerek, uygun işlem parametrelerinin gereken şekilde değiştirilebilmesi lazer kaynağının seri üretimde yaygın şekilde kullanılması neden olmuştur (Kaierle 1998).

Kritik parçaların üretilmesi aşamasında, kalite kontrolü için gereken parametrelerin bire-bir izlenmesi gerekir. Ortamdan alınan veriler doğrultusunda önceden belirlenen kalite şartlarını elde etmek için kaynak parametrelerinin değiştirilmesi gerekir. Bire-bir kaynak kalitesini izlemek için kaynak ortamında izlenecek parametreler belirlenir ve bu amaca uygun algılayıcılar ortama yerleştirilir. Algılayıcılardan elde edilen veriler matematiksel modellemelerde değerlendirilir. Elde edilen sonuçlar kaynak kalitesini etkileyen parametrelerin değiştirilmesi için kullanılır. Kaynak kalitesini belirlemede kullanılan yöntemler aşağıda belirtilmiştir.

- Sıcaklık ölçümü (Anahtar deliği yöntemi lazer kaynağında, malzemeden çıkan buharın dalga boyundan kaynak çukurunun sıcaklığı tahmin edilebilir (Park ve ark. 1996).)
- Ultrasonik algılama (Kaynak banyosunda katıdan sıvıya geçişteki ultrasonik yansımalar algılayıcılar kullanarak doğru bir şekilde algılanabilir. Elde edilen veriler ile kaynak hatası verileri uzman sistemler ile ilişkilendirilebilir.)
- Akustik emisyon izleme (Anahtar deliği lazer kaynağında, plazma üretimi, ısı gerilmeler ve faz geçişleri esnasında oluşan buharlaşmadan akustik sinyaller üretilir)
- Anahtar deliği metodu ve plazma izleme (Anahtar deliği kaynak işlemi esnasında metalden çıkan buhar görünür ve görünmez bölgede ışın yayar.)

Şekil 5.11’de CMOS kameradan elde edilen anahtar deliği kaynağı görüntüsü verilmiştir (Beersiek 1999).



Şekil 5.11: CMOS Kameradan alınan anahtar deliği lazer kaynağı işlemi görüntüsü

5.16 Belli Bir Lazer Cihazı İle Yapılabilecek Kaynak Derinliği Ve Hızının

Belirlenmesi

Güçü, dalga boyu ve çalışma modu belli olan bir lazer cihazı ile yapılabilecek kaynağın derinliği ve kaynak işleminin hızı yaklaşık olarak aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

Darbeli lazer durumunda: lazer darbe süresinin (τ) 1×10^{-4} ile 5×10^{-4} s arasında olması gerekir (Ready 2002). Kaynatılacak malzemenin cinsine bağlı olarak yutma katsayısı A uygun kaynaklardan seçilebilir. Bunun yanında, belirlenmesi gereken diğer esas parametreler ise lazer demetinin odak leke çapı ve kaynak hızıdır. Odak leke çapı, kaynatılacak olan yüzeyler arasındaki açıklığın büyüklüğüne ve dolgu malzemesi kullanılıp, kullanılmayacağına bağlı olarak belirlenmelidir. Genellikle uygulamalarda bu çap $0,2 \leq 2W_0 \leq 1$ mm olarak belirlenmektedir.

Odak leke çapı belirlendikten sonra odaklama amacı ile kullanılacak olan teleskop sisteminin odak uzaklığı hesaplanır.

Kaynatılmakta olan malzemenin leke alanındaki her hangi bir noktasının ısıtılma süresine bağlı olarak, malzemenin derinliklerinde meydana gelen sıcaklık formül 5.45'ten hesaplanabilir.

$$T(z, t = d/V) = \frac{2AP}{\pi k W_0^2} \sqrt{\frac{2xW_0}{V}} \exp\left(-\frac{z}{2\sqrt{2xW_0/V}}\right) \quad (5.45)$$

Formülde; t: Zaman (s), $2W_0$: Odak leke çapı (m), V: Tarama hızı (m/s), A: Malzemenin yutma katsayısı, P: Lazerin ortalama gücü (Watt), k: Isıl iletkenlik (W/mk), x: Isıl nüfuz (m^2/s), z: Sıcaklığı belirlenmekte olan noktanın derinliği (m).

Malzeme yüzeyinde oluşan sıcaklığı belirlemek için formü 5.45'de $z=0$ konulması gerekir (5.46).

$$T(z=0, t=d/V) = \frac{2AP}{\pi k W_0^2} \sqrt{\frac{2xW_0}{V}} \quad (5.46)$$

Lazer gücünün, odak leke çapının ve buharlaşma sıcaklığının belli olduğu durumlarda malzeme yüzeyini buharlaştırma sıcaklığına ulaştıracak kaynak hızı, formül 5.46'da $T=T_v$ alınarak belirlenebilir (5.47).

$$V = \frac{8xA^2P^2}{T_v^2\pi^2k^2W_0^3} \quad (5.47)$$

Çizelge 5.11'de metallere ait ısı özellikler verilmiştir.

Çizelge 5.11: Bazı metallerin ısı özellikleri(Ready 2002)

Metal	Isı kapasitesi, $C_p(J/gK)$	Isıl iletkenlik, $k(W/cmK)$	Isıl nüfuz, $\alpha(cm^2/s)$	Erime(T_m) sıcaklığı(K)	Buharlaşma(T_v) sıcaklığı(K)
Alüminyum	0,9	2,21	0,91	923	2333
Bakır	0,385	3,94	1,14	1356	2903
Altın	0,131	2,97	1,178	1338	3061
Demir	0,46	0,75	0,208	1808	3003
Nikel	0,44	0,92	0,235	1728	3448
Platin	0,131	0,69	0,245	2026	4134
Gümüş	0,234	4,18	1,705	1235	2466

Gösterilmiş yöntemlerle hesaplanmış olan kaynak hızında, ulaşılabilecek kaynak derinliği Formül 5.48'den hesaplanabilir.

$$z_{\max} = 2\sqrt{\left(\frac{2xW_0}{V}\right) \ln\left(\frac{T_v}{T_m}\right)} \quad (5.48)$$

Formülde: $z_{\max}$: Erime çukurunun derinliği, T_v : Malzemenin buharlaşma sıcaklığı, T_m : Malzemenin erime sıcaklığı, V : Kaynak hızıdır.

Kaynak hızının formül 5.47'den elde edilmiş değeri formül 5.48'de yerine konulursa kaynak derinliğini hesaplama imkanı sağlayan formül 5.49 elde edilir.

$$z_{\max} = \frac{W_0^2 T_v \pi k}{AP} \sqrt{\ln \frac{T_v}{T_m}} \quad (5.49)$$

Burada bahsedilen çözüme alternatif bir çözümün de; ilk önce ulaşılmak istenen kaynak derinliğini belirleyip sonra bu derinliği sağlamak için gereken kaynak hızının belirlenmesi olabilir. Kaynak hızı formül 5.48 kullanılarak Formül 5.50'deki gibi belirlenebilir.

$$V = \frac{8xW_0 \ln\left(\frac{T_v}{T_m}\right)}{Z_{\max}^2} \quad (5.50)$$

Formül 5.47 kullanılarak, gereken derinlik ve belirlenen kaynak hızında kaynak işlemini gerçekleştirmek için, gereken lazer ışın demetinin odak leke çapı formül 5.51'den hesaplanabilir.

$$W_0 = 23 \sqrt{\frac{x A^2 P^2}{V T_v^2 \pi^2 k^2}} \quad (5.51)$$

Pratik denemeler sonucunda bulunan kaynak derinliği ile odak leke çapı arasında 10:1 oranı olduğu tespit edilmiştir (Du 2000). Bu olgu dikkate alınarak, (5.49), (5.51) ifadelerine göre yapılacak olan hesaplamaların sonuçları ayarlanabilir.

Örnek: Gücü 1000 W olan bir Nd:YAG lazer cihazı ile krom saç malzeme kaynatılmak istenmektedir. Krom saç malzemeye ait ısıl katsayılar; T_m : 1800°K, T_v : 3020 °K, k : 24 W/mK, x : $8 \cdot 10^{-6}$ m²/s, C_p : 400 J/kg, K, A : 0.18 dir. Odak leke

yarıçapı 1 mm olduğuna göre metal yüzeyinde buharlaşma noktası oluşturacak kaynak hızı;

$$V = \frac{8xA^2P^2}{T_v^2\pi^2k^2W_0^3} = \frac{8 \times 8 \times 10^{-6} \times 0.18^2 \times 1000^2}{3020^2 \times \pi^2 \times 24^2 \times (1 \times 10^{-3})^3} = 0,039 m/s \cong 40 mm/s$$

Bu kaynak hızında ulaşılabilecek maksimum kaynak derinliği;

$$z_{\max} = 2\sqrt{\left(\frac{2xW_0}{V}\right)\ln\left(\frac{T_v}{T_m}\right)} = 2\sqrt{\left(\frac{2 \times 8 \times 10^{-6} \times 1 \cdot 10^{-3}}{40 \times 10^{-3}}\right)\ln\left(\frac{3020}{1800}\right)} = 0,91 mm$$

Söz konusu hız ve derinlikte gerçekleşen kaynağın soğuma hızı;

$$\frac{dT}{dt}(z=0) = \frac{PA\sqrt{x}}{\pi kW_0^2 \sqrt{2W_0/V}} = \frac{1000 \times 0,18 \sqrt{8 \times 10^{-6}}}{\pi \cdot 24 (1 \times 10^{-3})^2 \sqrt{2 \times 1 \times 10^{-3} / 0,039}} = 29817,66^\circ K/s$$

dır.

5.17 Gereken Derinlik Ve Hızda Kaynak Yapabilmek İçin Lazer Cihazının

Tipinin Ve Gücünün Belirlenmesi

Lazerle kaynak işleminde en sık karşılaşılan durum, kaynatılacak malzemenin cinsinin ve kaynak derinliğinin belli olduğu uygulamalardır.

Önce yapılacak işleme uygun lazer tipinin seçilmesi gerekir. Lazer cihazının tipinin belirlenmesinde ise lazer cihazının verimi, lazer ışın demetinin iş parçası üzerine nasıl yönlendirileceği (Fiber veya yansıtıcılar), lazer cihazından elde edilecek gücün birim maliyeti, bakım maliyeti, işletmede işgal edeceği yer, oluşabilecek bir arıza durumunda Ülke şartlarında tamir edilip edilmeyeceği vb. kriterler dikkate alınır. Bu kriterler dahilinde seçilen lazer ışınının malzeme tarafından yutulma oranı kolayca belirlenebilir.

Kaynatılacak malzemeye ait parametreler (x , T_v , T_m , k) ve kaynak derinliği ($z_{\max}$), ve genişliği ($2W_0$) belli olduğu için ilk aşamada kaynak hızı belirlenir (Formül 5.50).

Kaynak hızı belirlendikten sonra, formül 5.46'den malzeme yüzeyini buharlaştırma sıcaklığına ulaştıracak olan kaynak gücü formül 5.52'den elde edilir.

$$P = \frac{T_v \pi k W_0^2}{2A} \sqrt{\frac{V}{2W_0}} \quad (5.52)$$

Eğer derinlemesine nüfuz eden kaynak değil de iletim lazer kaynağı yapılacak olursa, malzeme yüzeyinin sıcaklığı erime sıcaklığının üstünde olacak şekilde seçilir. Eğer malzeme yüzey sıcaklığı olarak erime sıcaklığı seçilecek olursa, kaynak işlemi malzeme yüzeyinin çok ince bir katında meydana gelecektir ve sonuçta malzemeler kaynak edilmemiş gibi olacaktır. Malzeme yüzeyinin sıcaklığı, erime noktasının ne kadar üstünde seçilecek olursa (T_s) kaynak işleminin yüzeyden derinliği de $(T_s/T_m)^{1/2}$ ile orantılı olarak artacaktır ve kaynak derinliğinin artırılması ile iletim lazer kaynağı modundan derinlemesine nüfuz eden kaynak moduna doğru geçiş başlayacaktır.

İletim lazer kaynağı modu lazer kaynak gücünün malzemeyi buharlaşma sıcaklığına ulaştıramadığı fakat eritebildiği durumlarda yada çok ince (0,2 mm'nin altındaki saçları derinlemesine kaynak etmede) malzemelerin kaynak yapılmasında kullanılmaktadır.

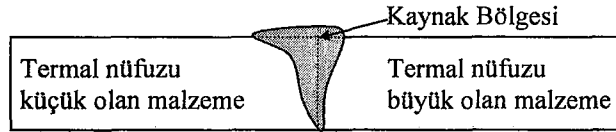
5.18 Farklı Metallerin Kaynak Edimesi

Farklı metallerin birbirine mükemmel bir şekilde kaynatılabilemesi için kaynatılacak malzemelerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin özdeş olması gerekir. Fiziksel özelliklerinden erime ve kaynama noktaları da eşit olacağından ($T_b \cong T_v$) birbirlerine kaynak yapılmasından elde edilen kaynak derinliğide aynı olacaktır.

Kaynatılacak malzemelerin kimyasal özelliklerinin özdeş olması fakat fiziksel özelliklerinden erime ve kaynama noktaları arasındaki fark fazlaştığında birbirlerine kaynatılmaları zorlaşacak ve bazı durumlarda mümkün olmayacaktır.

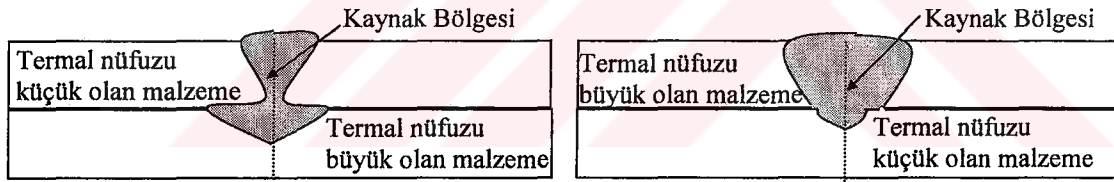
Şekil 5.12'de fiziksel özellikleri özdeş yalnızca termal nüfuz katsayıları farklı olan metalin alın kaynağı yapılması neticesinde oluşan anahtar deliğinin Şekli

görülmektedir. Termal nüfuz katsayısı küçük olan metalin içine lazer ışını daha geç sürede nüfuz ettiği için, nüfuz derinliğini artırmak için lazer ışının malzemeye uygulanma süresi artacak ve sonuçta malzeme yüzeyinde ısıdan etkilenen bölgenin artmasına neden olacaktır (Eagar, 1995).



Şekil 5.12: Termal nüfuz katsayıları birbirinden oldukça farklı olan iki metalin kaynak yapılmasında birleşme yüzeyindeki kaynak çukurunun şekli

Şekil 5.12’de Şekil 5.13’deki malzemelerin nokta kaynağı şeklinde kaynak yapılması sonucu oluşan kaynak derinliği ve anahtar deliği şekilleri verilmiştir (Eagar, 1995).



Şekil 5.13: Termal nüfuz katsayıları birbirinden oldukça farklı olan iki metalin kaynak yapılmasında birleşme yüzeyindeki kaynak çukurunun şekli

6. METALLERİ İŞLEMEK İÇİN Nd:YAG DARBELİ LAZER GÜÇ KAYNAĞININ TASARIMI

6.1 Giriş

Darbeli lazer güç kaynakları enerjiyi depolayıp boşaltmak için kapasitör, elektrik darbelerini şekillendirmek için indüktör, yüksek voltaj d.c. şarj kaynağı ve flaş lambasını iyonlaştırmak için tetikleme devresinden oluşur.

Elektriksel darbe sinyallerini şekillendirmek için RLC ve LC devreleri kullanılır. Kısa darbe süreleri elde etmek için RLC devresinde bir kondansatör ve indüktör kullanılır. Darbe şekillendirici devreler çeşitli LC devrelerinden oluşurlar ve darbe süresini artırmak için kullanılırlar.

Darbeli lazer güç kaynağını tasarlamak için ilk önce metal malzemeleri kaynatmak için belirlenecek lazer cihazına ait bazı parametrelerin bilinmesi gerekir. Uygulamada metal malzeme işlemek için kullanılan lazer cihazlarına ait parametreler ve değerleri Çizelge 6.1’de belirtildiği gibidir. Darbe tekrarlanma oranı malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişir (Timoty 1987, Hujii 1991).

Çizelge 6.1: Metal işlemede kullanılan Nd:YAG lazer cihazlarına ait Parametreler

Darbe şekli	Darbe enerjisi	Darbe süresi	Darbenin tekrarlanma oranı (P_r)
Üçgen	4 – 22 J	0.1-8-12 ms	10 – 100 Hz.
Dikdörtgen	4 – 22 J	0.1-8-12 ms	10 – 100 Hz.

Metal malzemeleri kaynatmak için lazer darbe enerjisini 8 J , darbe süresini 1 ms ve darbe tekrarlanma oranını 40 olarak seçilebilir. Odak leke çapı 0,7 mm olacak şekilde seçilirse malzemeye uygulanan güç yoğunluğu ;

$$P = \frac{E_p}{\tau_p} = \frac{8}{1 \times 10^{-3}} = 8000 \text{ W}$$

$$I_0 = \frac{P}{D} = \frac{8000}{\pi \times (0,07/2)^2} = 2,079 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$$

olarak bulunur (Koechner 1992). Metalleri kaynatmak için gereken güç yoğunluğu 10^4 - 10^6 W/cm² arasında olmalıdır. Cihazdan elde edilecek güç yoğunluğu metalleri kaynatmak için belirlenen güç yoğunluğu bandındadır (Ready 2002).

Nd:YAG lazer cihazının verimi % 1 ile % 5 arasındadır (Koechner 1992). Eğer lazer cihazının verimi % 1 olursa Flaş lambasının pompalaması gereken enerji aşağıdaki formülden bulunur.

$$E_{\text{flaş}} = \frac{E_p}{\eta_{\text{lazer}}} = \frac{8}{0,01} = 800 \text{ J.}$$

Görüldüğü gibi, ele alınmış olan örnekte flaş lambası tarafından pompalanması gereken enerji miktarı 800 J, darbe süresi ise 1 ms olmalıdır. İlk önce bu enerjiyi sağlayacak flaş lambasının seçilmesi gerekir.

6.2 Flaş Lambasının Seçilmesi

Flaş lambasının direnci, içinden geçen akımın değerine ve çalışma süresine bağlı olarak değişmektedir (LEOT Modül 4.4). Flaş lambasının karakteristik özelliklerinin bilinmesi, flaş devresinin çıkış parametrelerinin belirlenmesi için önemlidir. Lamba direncinin değişmesi, lambadan çıkan enerji miktarını ve lambayı besleyen güç devresi parametrelerini de etkilemektedir. Söz konusu sebeplerden, flaş lambasının çalışma şartlarındaki parametre değerlerinin kesin olarak belirlenmesi mümkün olmamaktadır.

Flaş lambasının vereceği enerji, flaş lambası üzerinden deşarj olacak kondansatörün kapasitesi ve şarj oluğu gerilimin değerine bağlıdır.

Flaş lambasının karakteristiği, deşarj zamanı, yaydığı ışığın spektrum ve verimi gibi parametreler belirli materyallerin pompalanması için kullanılmasına imkan sağlamaktadır.

Bir flaş lambasının yaydığı ışığın spektrumu, flaş lambasına doldurulan gazın cinsine bağlı olarak değişmektedir. Lazer elde edebilmek için flaş lambasının nispi olarak en fazla yaydığı ışığın dalga boyu ile aktif materyalin yutabileceği ışığın dalga boyunun aynı olması gerekir. Flaş lambasının yaydığı ışığın dalga boyu imalinde kullanılan gazın cinsine göre değişmektedir. Tasarlanacak lazer cihazında aktif

materyal olarak Nd:YAG lazer çubuk kullanıldığından, Ksenon gazı doldurulmuş flaş lambası seçilmelidir (Koechner 1992). Ksenon flaş lambaları 300-400 tor (mm-Hg) basıncında Ksenon gazı ile doldurulur.

Flaş lambaları belirlenen soğutma tipine göre iki şekilde üretilmektedirler.

- Hava soğutmalı flaş lambaları,
- Su soğutmalı flaş lambaları.

Hava soğutmalı flaş lambalarının çevresine harici olarak bir tetikleme iletkeni sarılmıştır. Bu iletkene uygulanan yüksek gerilim darbesiyle lamba içindeki gazın iyonlaşması sağlanır. Sıvı soğutmalı flaş lambalarında tetikleme iletkeni bulunmaz. Lamba uçlarına yüksek gerilim vererek lamba içindeki gazın iyonlaşması sağlanır. Sıvı soğutmalı flaş lambasında harici bir tetikleme iletkeni kullanılacak olursa, harici iletkenin su jetinden özel yöntemlerle yalıtılması gerekir. Bu işlemi gerçekleştirmek zor olduğu için sıvı soğutmalı flaş lambaları genellikle dahili olarak tetiklenir.

Dizayn edilecek cihazın flaş lambasına uygulanacak enerji miktarı 800 J olması gerekir. Ksenon flaş lambaların verimi % 30 civarındadır (Leot Module 3.4). Lazer çubukta meydana gelen enerji kaybı;

$$E_{kflaş} = E_{flas} (1 - \eta_{flas}) = 800 \times (1 - 0,3) = 560 \text{ J.}$$

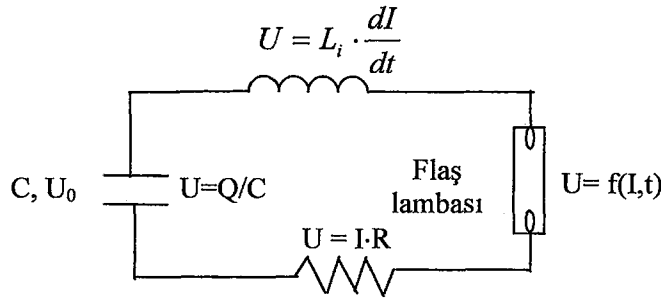
olacaktır. Meydana gelen ısıнын, hava soğutmalı olarak flaş lambasından uzaklaştırılması çok zor olacağından tasarlanacak sistemin su soğutmalı olması gerekir. Sistem, su soğutmalı olduğu için seçilecek flaş lambasının harici tetikleme sargısı olmayacak şekilde seçilebilir.

Flaş lambasının karakteristiği doldurulan gazın tipi, ve basıncına bağlı olarak değişmektedir. Flaş lambasının karakteristik değerleri kesin olarak belirlenmediğinden, çıkışında elde edilecek enerjinin de kesin bir şekilde belirlenmesi mümkün değildir.

Flaş lambası çıkışındaki enerjinin azalmasına iki şey sebep olur. Birincisi, lamba içindeki gazda bulunan yabancı maddeler yüzünden optik çıkış zamanla azalır. Elektro mekanik işlere tabi tutulmadan önce lambanın bütün parçaları uygun şekilde temizlenmelidir. Eğer temizlenmezlerse, lamba içinde iyon bombardımanı esnasında içeride bulunan yabancı maddeler elektrotlar üzerinde bir tabaka oluşmasına ve lamba direncinin zamanla artmasına sebep olur. Eğer lamba içinde elektrotlar ile kılıf

arasına yerleştirilen sızdırmazlık elemanları lamba içindeki gazı dışarıya sızdırırsa lamba iç basıncı atmosfer basıncına eşit olur ve sonuçta lamba tetiklenemez.

Flaş lambanın elektriksel direnci belli bir trendi izlemediğinden kondansatörün şarj gerilimine karşı flaş lambasından elde edilen enerjinin grafiğini çizerek, buradan ilettime ait bir takım parametreleri elde etmek en iyi yöntemdir (Yadong ve ark.). Flaş lambasının elektrik özelliklerini belirlemek için genellikle Şekil 6.1'deki devre kullanılır.



Şekil 6.1: Flaş lambanın karakteristik devresi

Şekil 6.1'de gösterilen devredeki kondansatör geriliminin değeri, formül 6.1'de devre akımının değeri yerine konarak hesaplanır.

$$U_0 = \frac{Q}{C} + L_i \frac{dI}{dt} + RI + f(I, t) \quad (6.1)$$

Kondansatörün depoladığı enerji miktarının şarj olduğu gerilim değerine bağlıdır ve formül 6.2'den hesaplanabilir.

$$Q = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (6.2)$$

Formülde; U_0 : Kondansatör gerilimi, Q : Kondansatördeki yük miktarı, C : Kondansatörün kapasitesi, L_i : Devre indüktansı, I : Devreden geçen akım, R : Devre direnci, $f(I, t)$: Herhangi bir anda devreden akan akımın flaş lambasında meydana getirdiği gerilim düşümüdür.

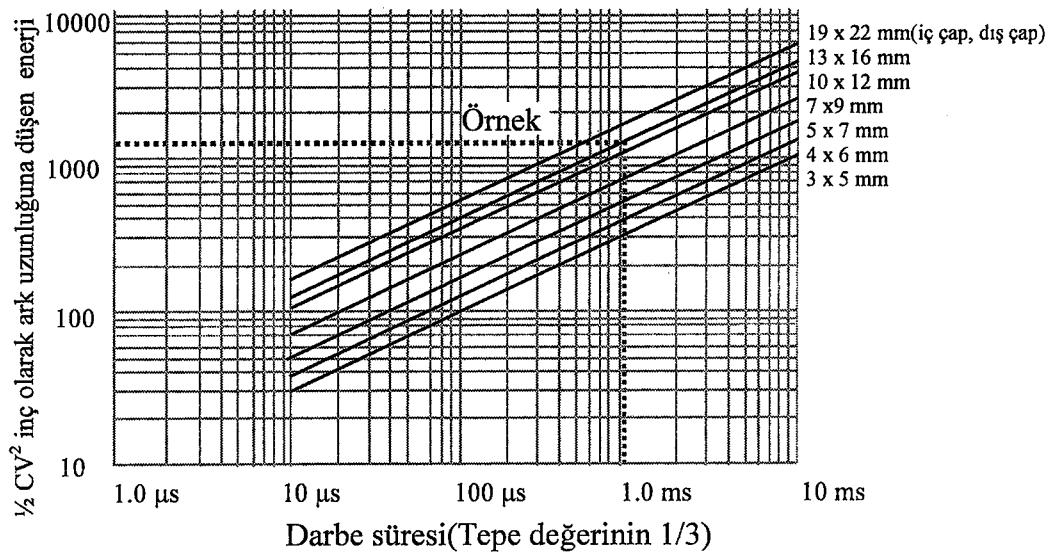
Flaş lambasının boyutlarını belirleyebilmek için, ilk önce tahmini çalışma ömrünün belirlenmesi gerekir.

6.2.1 Flaş Lambasının Ömrü

Flaş lambasının ömrü, tetikleme sayısı, uygulanan deşarj enerjisi, darbe süresi, lambaya uygulanan gerilimin tepe değeri ve akım darbelerinin yükselme sürelerine bağlı olarak değişmektedir.

Flaş lambasının elektrotları etrafında meydana gelen kararmalar, üretilen ışığın lamba içinde yutulmasına sebep olup, lazer çıkışında meydana gelen ışığın önemli oranda azalmasına neden olur.

Lamba genellikle şu iki olaydan birine maruz kalır. En sık karşılaşılan olay, lamba içinde iyonize olan gazın basıncı ve sıcaklığı hızlı bir şekilde yükselerek mekanik şok dalgalarının oluşmasına sebep olur. Şok dalgalarının oluşması akım darbesinin yükselme zamanına bağlıdır. Bu sebepten deşarj devreleri, oldukça kısa yükselme zamanlarından kaçınılacak şekilde dizayn edilmelidir. Optimum darbe şekli sağlansa bile tanımlanan üst enerji seviyesini aşacak şekilde güçlü bir darbe uygulanacak olursa lambanın içinde oluşan basınç, lamba kılıfının taşıyabileceği basınç değerini aşıp lambanın patlamasına sebep olur.



Şekil 6.2: Ksenon gazı doldurulmuş farklı çaplardaki flaş lambalarının darbe süresine bağlı olarak ark uzunluğuna düşen patlama enerjisinin değişimi

Şekil 6.2’de, çeşitli tip lineer ksenon flaş lambalarına ait darbe süresine bağlı olarak, lamba ark uzunluğuna düşen enerji miktarı verilmiştir.

Dizayn edilecek lazer cihazı için iç çapı 13 mm, ark uzunluğu 6.5 inç olan Ksenon flaş lambasını seçelim. Elde edilmek istenen darbe süresi ise 1 ms dir. Şekil 6.2’den, 1 ms darbe süresi için lambanın birim ark uzunluğuna düşebilecek enerji miktarı 1200 J/inç. olarak okunur. Lambanın maruz kalabileceği toplam enerji miktarı ise;

$$E_0 = 1200(\text{J/inç}) \times 6.5(\text{inç})$$

$$E_0 = 7800 \text{ J olarak bulunur.}$$

6.2.2 Flaş Lambasının Patlama Enerjisi

Patlama enerjisi; flaş lambasını bir daha kullanılmayacak hale getirecek belli bir genişlikteki tek bir darbenin üretebileceği enerji miktarıdır. Patlama enerjisi formül 6.3’den hesaplanabilir.

$$E_{pl} = k_{si} d L_a (t_{1/3})^{1/2} \quad (6.3)$$

Formülde; E_{pl} : Patlama enerjisi, k_{si} : 90 (sihirli sayı), d : tüpün yarıçapı (mm), L_a : ark uzunluğu (inç), $t_{1/3}$: akımın darbe süresi (ms)dir.

Tasarlanan lazer cihazı için seçilen flaş lambası tüpünün iç çapı 13 mm, ark uzunluğu 6,5 inç, darbe süresi 1 ms dir. Seçilen flaş lambası için patlama enerjisi;

$$E_{pl} = 90 \times 13 \times 6,5 \times (1)^{1/2} \cong 7605 \text{ J olarak bulunur.}$$

Bir flaş lambanın çalışma enerjisi ($E_{\phi} = E_{\text{flaş}}$) ile patlama enerjisi (E_0) arasındaki orana bağlı olarak tahmini ömrü Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Tasarım için, seçilen flaş lambasının tahmini ömrünü bulmak için önce; flaş lambasının her seferinde maruz kalacağı enerji miktarının ($E_{\phi} = 800 \text{ J}$), seçilen flaş lambasının bir seferde maruz kalabileceği maksimum enerjiye ($E_0 = 7800 \text{ J}$) oranı bulunur.

$$\frac{E_{\phi}}{E_0} = \frac{800}{7800} \cong 0,1 \text{ dir.}$$

0,1 değerine karşılık gelen değer Çizelge 6.2'den okunarak, flaş lambasının ömrü 10^6 darbe olarak bulunur. Eğer, flaş lambası seçilirken ömrü ön planda tutulacak olursa, ilk önce çalışması gereken tahmini darbe sayısına karşılık çizelge 6.2'den E_c/E_0 oranı okunur. Flaş lambasının bir kerede maruz kalabileceği enerji miktarı (E_0) hesaplanır. Lambanın maruz kalacağı enerji miktarı ve darbe süresine uygun olarak flaş lambası çapı ve ark uzunluğu Şekil 6.2'den belirlenir.

Çizelge 6.2: Çalışma enerjisinin, patlama enerjisine oranına bağlı olarak değişen lambanın tahmini ömrü

E_c/E_0	Lambanın ömrü (Darbe sayısı)	E_c/E_0	Lambanın ömrü (Darbe sayısı)
0,1	$>10^6$	0,6	50 – 300
0,2	$>10^5$	0,7	10-75
0,3	$>10^4-10^6$	0,8	4-20
0,4	1.000 – 30.000	0,9	2-5
0,5	200 – 3.000	1,0	1

6.2.3 Flaş Lambasının Elektriksel Direncinin Hesaplanması

Flaş ve gaz deşarjlı lambaların başlangıç dirençleri çok yüksektir ve negatif dinamik dirençleri vardır. Flaş lambasının deşarj esnasındaki direnci, formül (6.4)'den hesaplanabilir.

$$R = \frac{\rho_k L_a}{A_{ks}} \quad (6.4)$$

Formülde; R : Deşarj anında lambanın direnci (Ω), ρ_k : Deşarj anında Ksenon plazmasının öz direnci (Ω/cm), L_a : Ark uzunluğu (Elektrotlar arasındaki mesafe, cm), A_{ks} : Ksenon plazmasının kesit alanı (Koruyucu kılıfın iç alanı cm^2)dır.

Ksenon gazının öz direnci 0,020 $\Omega\text{-cm}$ olduğuna göre seçilen flaş lambasının iç direncini hesaplayacak olursak, (Koruyucu kılıf iç çapı 13 mm ark uzunluğu 6,5 inçtir (16.51cm)).

$$R = \frac{\rho_k L_a}{A_{ks}} = \frac{0.020 \times 16,51}{\pi(0,65)^2} = 0,249\Omega \text{ olarak bulunur.}$$

Ksenon gazının öz direnci, akım yoğunluğuna bağlı olarak gazın iyonlaşma derecesi ile değişmektedir. Lambanın kesit alanından geçen akım, akım yoğunluğu olarak tanımlanır (A/cm^2). Akım yoğunluğu arttıkça gazın öz direnci azalır. Flaş lambasında kullanılan Ksenon gazının öz direnci 0,015 ila 0,025 $\Omega\text{-cm}$ arasındadır.

Genel kural olarak ksenon gazının darbe süresine bağlı olarak öz direnci, 100 μs darbe süresinin altında $\rho_k = 0.015 \Omega\text{-cm}$, 100 μs ila 1 ms darbe süreleri arasında $\rho_k = 0.020 \Omega\text{-cm}$, 1 ms darbe süresinin üzerinde $\rho_k = 0.025 \Omega\text{-cm}$ dir. Flaş lambaya uygulanan elektrik darbesi esnasında, akım yoğunluğu değiştiğinden, öz direnç ve sonuçta gazın direnci değişecektir.

Yukarıda sözü edilen kriterler göz önünde tutulursa, flaş lambasının iç direnci;

(Flaş lambasına uygulanan darbenin süresi 1ms olduğu için $\rho_k = 0.025 \Omega\text{-cm}$)

$$R = \frac{\rho_k L_a}{A_{ks}} = \frac{0.025 \times 16,51}{\pi \times (0,65)^2} = 0,310\Omega \text{ olur.}$$

6.2.4 Flaş Lambasının K_0 Parametresinin Hesaplanması

Faz şekillendirici devrede flaş lambası omik direnç gibi davranır. Faz şekillendirici devre, dinamik empedans (k_0) değerine bağlı olarak dizayn edilir. Lamba üzerinde düşen voltaj formül 6.5'den hesaplanabilir.

$$U = K_0 \sqrt{I} \quad (6.5)$$

Formülde U: Lamba üzerinde düşen gerilimin değeri, I: Flaş lambasına U gerilimi uygulandığı anda içinden geçen akım değeridir.

Flaş lambasının dinamik empedansı formül 6.6'dan hesaplanabilir.

$$K_0 = 1,28 \frac{L_a}{d_{fl}} \left(\frac{P_f}{x} \right)^{1/5} \quad (6.6)$$

Formülde; K_0 : Lambanın dinamik empedansı L_a : Flaş lambasının ark uzunluğu (mm), d_{fl} : Flaş lambası tüpünün çapı (mm) P_f : Flaş tüpüne doldurulan gazın basıncı (300-400 mm/hg,Torr), x_s : Sihirli sayı (Ksenon gazı için 450, Kripton için 805)dir. Seçilen flaş lambasının dinamik empedansı ise;

$$K_{0300} = 1,28 \frac{L_a}{d_{fl}} \left(\frac{P_f}{x} \right)^{1/5} = 1,28 \frac{165,1}{13} \left(\frac{300}{450} \right)^{1/5} = 14,98$$

$$K_{0400} = 1,28 \frac{L_a}{d_{fl}} \left(\frac{P_f}{x} \right)^{1/5} = 1,28 \frac{165,1}{13} \left(\frac{400}{450} \right)^{1/5} = 15,87$$

olarak bulunur.

6.2.5 Flaş Lambası Üzerinden Deşarj Olacak Kondansatör Kapasitesinin Belirlenmesi

Flaş lambası çıkışında gereken enerjiyi almak için kullanılacak kapasitörün değeri formül 6.7'den hesaplanabilir.

$$C = \sqrt[3]{\frac{0,09 E_{flas} t_p^2}{k_o^4}} \quad (6.7)$$

Formülde; C: Kondansatörün kapasitesi, E_{flas} : Flaş lambasına uygulanacak enerji, t_p : Flaş lambasına uygulanan darbenin tepe değerine ulaşması için gereken sürenin %10'unu k_0 : Lambanın empedans sabitidir.

Tasarlanan güç kaynağı için K_0 empedansı Ksenon flaş tüpünün iç basıncına bağlı olarak 14,98 ila 15,87 arasında olmaktadır. Kullanılacak kondansatörün kapasitesi;

$$C_{300} = \sqrt[3]{\frac{0,09 \times 800 (0,1 \times 10^{-3})^2}{14,98^4}} = 242,71 \mu F \approx 250 \mu F$$

$$C_{400} = \sqrt[3]{\frac{0,09 \times 800 (0,1 \times 10^{-3})^2}{15,87^4}} = 224,71 \mu F \cong 230 \mu F$$

6.2.6 Flaş Lambasından Akan Akımın Tepe Değeri

Flaş lambasından akan akımın tepe değeri, lambanın yaymış olduğu ışığın spektrumunu etkilemektedir. Bu sebepten flaş lambasından geçen akımın tepe değerinin de bilinmesi gerekir. Flaş lambasının içinden geçen akım formül 6.8'den hesaplanabilir.

$$I_{pk} = \frac{U_s}{Z_0 + R_t} \quad (6.8)$$

Formülde; U_s : Başlangıçta kondansatörün şarj olması gereken gerilim değeri
 Z_0 : Devrenin empedansı $\sqrt{L_i / C}$ dir.

Eğer flaş lambası yüksek tepe güç yoğunluğunda çalıştırılırsa her tetiklemeden sonra flaş lambasının duvarlarında metal buharlaşması oluşur. Söz konusu olay flaş lambasının elektrotlar ile koruyucu cam iç duvarlarında beyaz tozlar şeklinde gözükür. Bu durumda lambanın ürettiği ışığın lamba koruyucu kılıfı tarafından yutulmasına lamba sıcaklığının artarak sonuçta lamba optik çıkışının azalmasına sebep olur.

6.3 Darbeli Lazer Güç Kaynaklarının Temel Elemanları

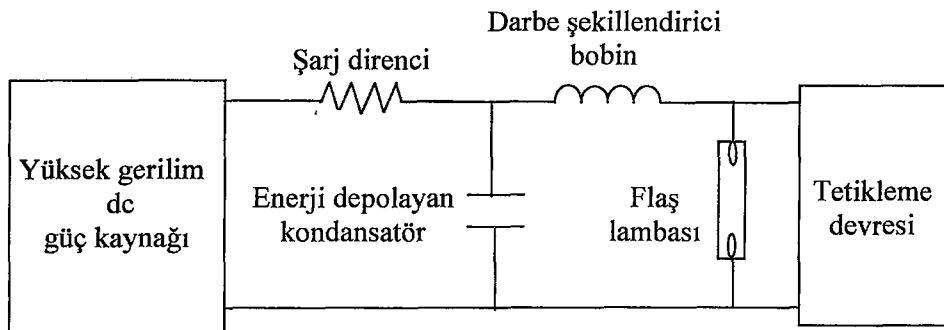
Darbeli lazerlerin güç kaynağından sağlanan elektrik enerjisini depolayan kondansatör, aktif ortamı uyarmada kullanılan flaş lambası üzerinden deşarj olur. Flaş lambası üzerinden geçen akım darbeleri, yarı iletken ve gaz lazerlerde olduğu gibi flaş lambasının yakılmasını sağlar.

Elektrik darbeleri ile çalıştırılan lazerlerden sadece yarı iletken lazerlerin elektrik direnci kısmen sabittir. Flaş lambası ve gaz deşarjlı cihazların negatif direnç

karakteristikleri vardır. Flaş lambası ve gaz deşarjlı lazerlerin güç kaynakları genellikle aşağıda belirtilen üç esas devreden oluşur.

- Enerji depolama ve darbe şekillendirici devre, genellikle LC devresi kullanılır. Lazer tetiklendiğinde LC devresi, gaz deşarjından sonra oluşan lamba rezistansı ile birlikte bir RLC devresi oluşturur. Kapasitörden flaş lambasına enerji transferi darbe süresi içinde gerçekleştirilmesi gerekir. Belirlenen darbe süresini elde edecek şekilde LC devresindeki indüktörün değeri seçilir.
- Şarj devresi, kapasitörü gereken gerilim değerine şarj edecek d.c. güç kaynağından oluşur. Güç kaynağının çıkış gerilimi birkaç kilo volt mertebesinde dir. Darbeli ve sürekli lazerlerdeki güç kaynaklarının şarj devreleri aynı özelliklere sahiptir.
- Tetikleme devresi, flaş lambasında gaz deşarjı olayının başlaması için tetikleme darbesi üretir. Enerji depolayan sistemin genellikle maksimum voltajı, gaz deşarjı olayının başlaması için gereken gerilim değerinin altındadır. Bu sebepten, başlangıçta, flaş lambanın yakılması için yüksek voltajlı darbelerin üretilmesi gerekir.

En yaygın olarak kullanılan güç kaynağı, darbeli katı-hal lazerlerinde bulunan flaş lambasını çalıştırmak için kullanılmaktadır. Şekil 6.3’de darbeli lazer cihazı güç kaynağının basitleştirilmiş şeması verilmiştir.



Şekil 6.3: Darbeli katı hal lazerinde kullanılan flaş lambasının basitleştirilmiş güç kaynağı devre şeması

Yüksek gerilim d.c. güç kaynağı kondansatörü belirlenen gerilim değerine şarj etmekte kullanılır. Şarj direnci kondansatörün şarjı esnasında devreden geçen akımı sınırlandırmak için kullanılır. Kondansatör gerekli gerilim değerine şarj olduğunda güç kaynağı ile kondansatörün bağlantısı kesilir.

Yüksek voltaj tetikleme devresinde üretilen ateşleme darbesi ile flaş lambası tetiklenir. Lamba içinde iyonize olmuş gaz üzerinden kapasitör deşarj edilir.

6.3.1 Enerji Depolama Ve Darbe Şekillendirici Devreler

Yüksek gerilim kapasitörleri, yüksek gerilim güç çıkışından şarj olup çok hızlı bir şekilde (milisaniye veya daha az) flaş lambası üzerinden deşarj olur. Kondansatörde depolanan enerjinin miktarı kapasitörün kapasitesine ve şarj olduğu gerilim değerine bağlı olarak formül 6.9'dan hesaplanabilir.

$$E = \frac{1}{2} C U_s^2 \quad (6.9)$$

Formülde; E : Depolanan elektrik enerjisi (J), C : Kapasitör (F), U_s : Kapasitörün şarj olduğu voltaj (V.) değeridir.

Flaş lambası için aşağıda belirtilen iki tip kondansatör deşarj devresi kullanılır.

- RLC deşarj devresi
- Darbe şekillendirici devre (*Pulse Figure Network, PFN*)

Deşarj devresinde hangi tip devrenin kullanılacağına karar verirken darbe genişliği, darbe şekli, deşarj edilecek kondansatörün şarj olduğu gerilim ve depoladığı enerjinin miktarı gibi kriterler göz önünde bulundurulur. RLC devreleri kısa darbe süresi üretmek için darbe şekillendirici devre ise uzun darbe süresi üretilmesi gereksinimini karşılamak için kullanılır.

6.3.1.1. RLC Deşarj Devresi

RLC deşarj devre şeması Şekil 6.3'te gösterilmiştir. RLC deşarj devresi enerjiyi depolayan bir kondansatör, darbe şekillendirici bir indüktör ve flaş lambasının iç direncinden oluşur. Başlangıçta flaş lambanın başlangıçta iç direnci çok yüksek olduğu için, RLC devresinde bulunan kondansatör devre gerilimine şarj olur. Flaş lambası tetiklendiğinde devre tamamlanarak şarj kondansatörü flaş lambası devresinden akım akar. Kondansatörün deşarjı esnasında devre akımının değeri formül 6.10'dan hesaplanabilir.

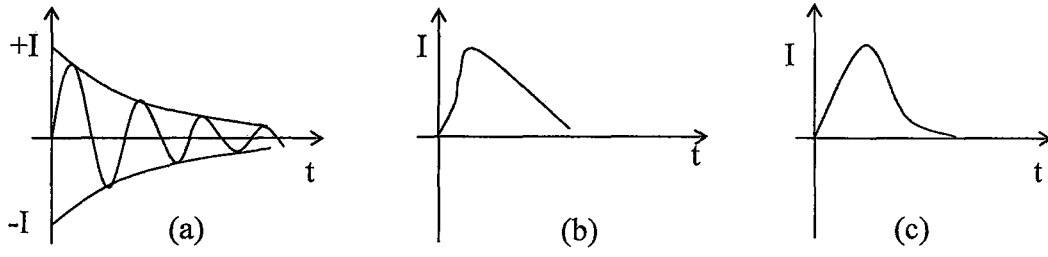
$$i = 2\pi f_{\varphi} U_{\varphi} C e^{-\frac{R \cdot t}{2 \cdot L_i}} (\sin 2\pi f t) \quad (6.10)$$

Formülde; t: Zaman (t = 0 lambanın iletme geçtiği an), U_{φ} : Kapasitörün şarj gerilimi (t = 0 anındaki gerilim), f_{φ} : Çevrim frekansı (formül 6.11)dır.

$$f_{\varphi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2}} \quad (6.11)$$

Devre elamanlarının değerlerine bağlı olarak devrenin deşarj akımı üç değişik şekilde seyredebilir. Oluşabilecek deşarj akımının görüntüleri Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Eğer çevrim frekansında yer alan $\frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2}$ terimi; $\frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2} > 0$ ise; sönümlü (Şekil 6.4.a), $\frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2} < 0$ ise; aşırı sönümlü (Şekil 6.4.b), $\frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2} = 0$ ise; kritik sönümlü (Şekil 6.4.c), olacaktır.

Şekil 6.4 (a)'daki sönümlü devrede ters yönde akan akım tepe akımından, % 20 büyükse, kapasitördeki di-elektrik malzemenin çeşitli kuvvetlere maruz kalıp, ömrünün azalmasına sebep olur. Devre akımının yön değiştirmesi esnasında, akımın her sıfır noktasından geçişinde lamba söner ve kondansatör uçlarındaki polarizenin değişmesine neden olur. Şekil 6.4 (b)'deki aşırı sönümlü devrede akımın yükselme zamanı $t_r = 2L_i/R$, zaman sabiti ise $t_d = R \cdot C$ dir.



Şekil 6.4: RLC deşarj akımları a) Sönümlü, b) Aşırı sönümlü c) Kritik sönümlü

Aşırı sönümlü devrede yükselme zamanı, devrenin zaman sabitinden çok küçük olursa, devre akımı çok hızlı bir şekilde yükselerek flaş lambasının gereksiz yere zorlanmasına sebep olur. Şekil 6.3'deki devrenin zaman sabiti formül 6.12'den hesaplanabilir.

$$\tau = RC \quad (6.12)$$

Formülde R: devrenin direnci ve C: Kondansatörün kapasite değeridir.

Tasarlanacak deşarj devresi Şekil 6.4'deki gibi seçilecek olursa, devrede R direncinin değeri 0,249 Ω kondansatörün depolaması gereken enerji miktarı 800 J. ve elde edilmek istenen darbe süresi 1 ms ise, kritik sönümlü devre için elemanların değeri;

$$\text{Kondansatörün değeri; } C = \frac{\tau_p}{R} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,249} = 4016 \mu F,$$

$$\text{Devrenin kritik sönümlü olması için } \frac{1}{L_i C} - \frac{R^2}{4L_i^2} = 0 \text{ olmalıdır.}$$

$$\text{İndüktörün değeri ; } L_i = \frac{R^2 C}{4} = \frac{0,249^2 \times 4016 \times 10^{-6}}{4} = 62,24 \mu H$$

Kondansatörün şarj olması gereken voltaj değeri;

$$U_s = \sqrt{\frac{2 \times E}{C}} = \sqrt{\frac{2 \times 800}{4016 \times 10^{-6}}} = 631,194 V. \text{ olarak bulunur.}$$

RLC Devresi dizayn edilirken şu prosedür takip etmek gerekir.

- Seçilen kaviteye uygun flaş lambası boyutları tespit edilir (Ark uzunluğu, çapı).
- Lambaya uygulanacak darbenin süresi belirlenir.
- Flaş lambasının tetiklenmesi için gereken minimum darbe sayısı belirlenir.
- Formül 6.4'den flaş lambasının elektriksel direnci hesaplanır.
- Formül 6.12'den gereken kondansatörün kapasitesi ve formül 6.11'den devrenin kritik sönümlü olması için indüktör değeri belirlenir ($f_c=0$ dan, $L=R^2C/4$).
- Çizelge 6.1'den, belirlenen minimum lamba ömrünü sağlayacak E_c/E_0 oranı bulunur.
- Şekil 6.2'den, lambanın bir kerede maruz kalabileceği enerji miktarı E_0 değeri hesaplanır.
- Hesaplanan E değerini sağlayacak kapasitörün şarj olması gereken gerilimin

değeri $U_s = \sqrt{\frac{2E}{C}}$ formülünden hesaplanabilir.

6.3.1.2. Faz Şekillendirici Deşarj Devresi

Darbe şekillendirici devre Şekil 6.5'de gösterildiği L , C devrelerinden oluşur. Darbe şekillendirici devre sabit bir akım seviyesinde kare şeklinde deşarj akımları elde etmek için kullanılır. Basit RLC devreleri ile darbe süresinin artırılmadığı durumlarda faz şekillendirici devre kullanılır. Şekil 6.5'deki elemanların değerleri aynıdır. Şekil 6.6'da darbe şekillendirici devrenin çıkışında lamba akımının eğrisi verilmiştir.

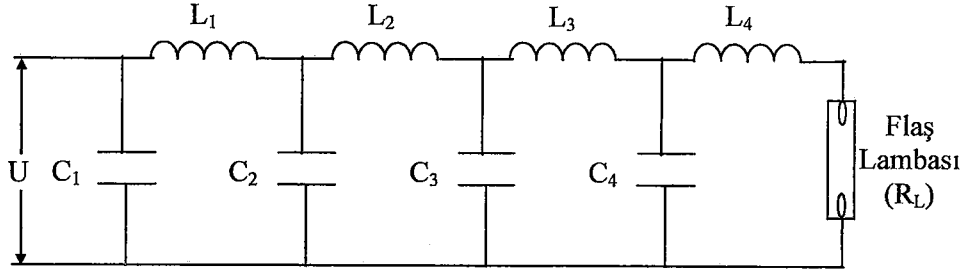
Şekil 6.5'deki devre elemanlarından, direnç değeri formül 6.13'den , kapasitör değeri formül 6.14'den indüktör değeri ise formül 6.15'den hesaplanabilir.

$$R = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{L_i}{C}} \quad (6.13)$$

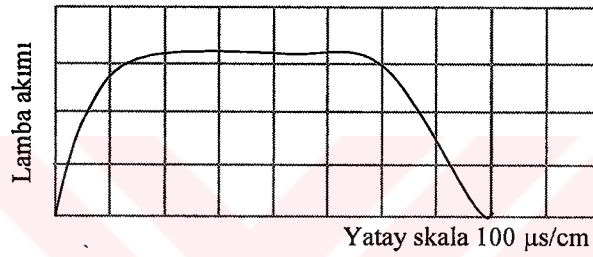
$$C = \frac{\tau_p}{2NR} \quad (6.14)$$

$$L_i = \frac{\tau_p R}{2N} \quad (6.15)$$

Formüllerde; R: Lamba direnci, L_i : İndüktans, τ_p : Darbe süresi, C: Kapasite, N: Darbe şekillendiricide bulunan LC devre sayısıdır.



Şekil 6.5 : Faz şekillendiricinin devre şeması



Şekil 6.6 : Darbe şekillendirici devre kullanılan deşarj devresinde flaş lambasının darbe akımı

L, C devre sayısı formül 6.16'dan hesaplanır.

$$N = \frac{\tau_p}{2t_r} \quad (6.16)$$

Formülde; τ_p : Darbe süresi, t_r : Yükselme zamanı (Darbenin ortalama tepe genliğinin % 10 ile % 80 arasındaki süre)dir.

Darbenin ortalama tepe genliğinin % 70'ine ulaşılması için geçen süre (T_s) formül 6.17'den hesaplanabilir.

$$T_s = 2\sqrt{L_i C} \quad (6.17)$$

Eğer deşarj devresi, Şekil 6.5'deki devrede ile gerçekleştirilecek olursa, R direncinin değeri 0,249 Ω kondansatörün depolaması gereken enerji miktarı 800 J.ve elde edilmek istenen darbenin yükselme zamanı 0,1 ms ve darbe süresi 1 ms olacak şekilde devre elemanların değeri;

$$N = \frac{\tau_p}{2t_r} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 0,1 \times 10^{-3}} = 5 ; \text{LC devresinin sayısı}$$

$$C = \frac{\tau_p}{2 \times N \times R} = \frac{1 \times 10^{-3}}{2 \times 5 \times 0,249} = 401 \mu F ; \text{her bir kondansatörün kapasitesi}$$

$$L_i = \frac{\tau_p R}{2N} = \frac{1 \times 10^{-3} \times 0,249}{2 \times 5} = 24,9 \mu H ; \text{her bir indüktörün indüktans}$$

Kondansatörün şarj gerilimi;

$$U_s = \sqrt{\frac{2E}{C_T}} = \sqrt{\frac{2 \times 800}{5 \times 401 \times 10^{-6}}} = 893,31 V.$$

olarak bulunur.

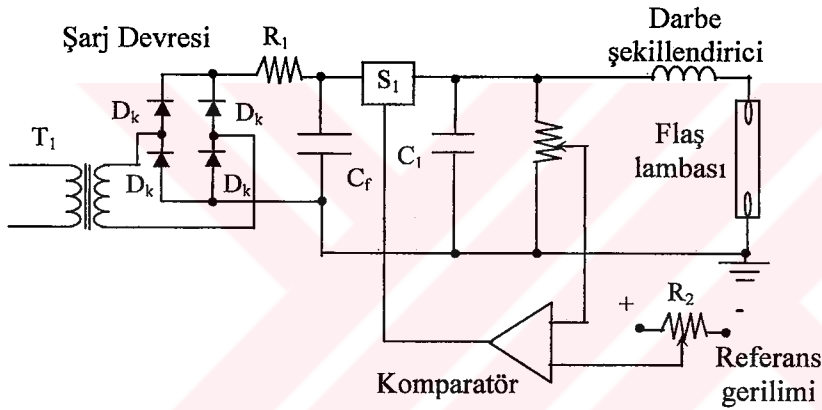
Lazer cihazının verimi tasarım aşamasında kesin olarak tespit edilememektedir. Cihaz çıkışında, gereken enerji miktarını elde etmek için kondansatörün depolaması gereken enerji miktarı ise, cihaz verimine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Dolayısı ile cihaz veriminin tahmin edilen değerinden farklı olması durumunda kondansatörün şarj edilmesi gereken gerilim değerinin yeniden hesaplanması gerekmektedir. Hesaplamalar sonucunda, lazer çıkışından elde edilmesi gereken enerji miktarı bellidir. Tasarlanan güç kaynağı devresinde kondansatörün şarj olduğu gerilim değeri ölçülerek depoladığı enerji miktarı formül 6.7'den hesaplanır. Lazer çıkışında, lazerin darbe enerjisi ölçülerek(E_{ol}) cihazın verimi formül 6.18'den hesaplanır.

$$\% \eta = \frac{2E_{ol}}{CU_s^2} 100 \quad (6.18)$$

Lazer çıkışında elde edilecek enerji miktarından (E_{cg}), kondansatörün şarj edileceği gerilim değeri (U_s) formül 6.19'dan belirlenir.

$$U_s = \sqrt{\frac{2E_{cg}}{\eta C}} \quad (6.19)$$

Kondansatörün şarj gerilimini değiştirmek için Şekil 6.7'de verilen devre kullanılabilir. Bu devrede komparatörün referans gerilimi ayarlanarak kondansatörün şarj olması gereken gerilim değeri değiştirilebilir.



Şekil 6.7: Darbeli katı hal lazeri şarj devresindeki kondansatörün belirlenen gerilim değerinde şarj edilmesi

6.3.1.3 Darbe Şekillendirici Ve RLC Devrelerinde Kullanılan Elemanlarda Aranılan Özellikler

Deşarj devresinde kullanılan kondansatörler ve indüktörler özel olarak imal edilirler. Deşarj devresinde kullanılan kondansatörler, foto-flaş , enerji depolayan, enerji deşarj kondansatörleri olarak adlandırılır. Kapasitör için aşağıda belirtilen değerler mutlaka bilinmelidir.

- Maksimum şarj voltajı
- Kapasitansı

- Görev saykılı
- Ömrü (Kaç kere şarj edilip deşarj edilebilir.)

Kondansatörün ömrünü, imalatında kullanılan di-elektrik malzeme belirler (Bayrak 2002). Kondansatörler genellikle $10^4 - 10^6$ kere bazı özel kondansatörlerde ise 10^8 ila 10^9 kere deşarj edilebilir.

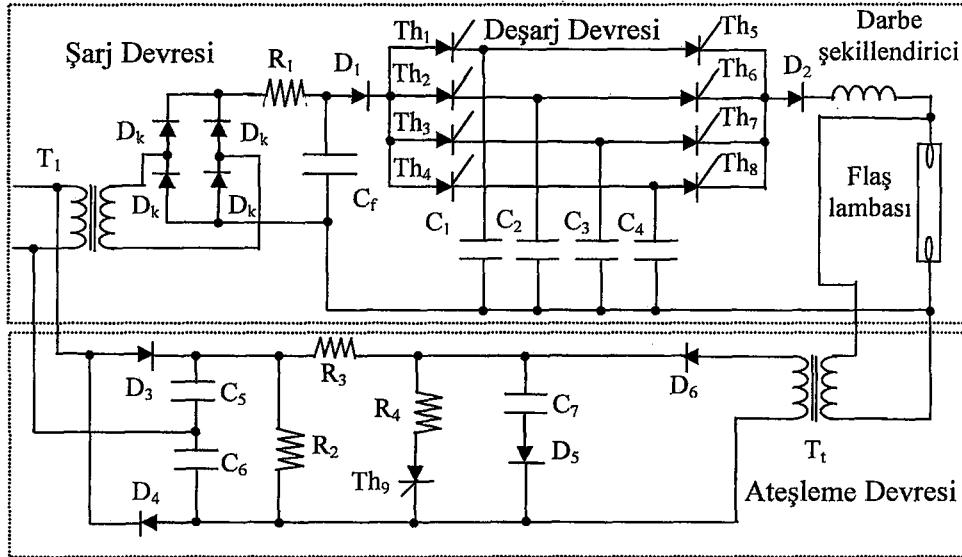
Lazer cihazlarında, yüksek darbe frekansı tekrarlama gereksinimi talebini karşılamak için, deşarj devresinde bulunan kondansatörlerin yüksek frekanslarda şarj ve deşarj edilmesi gerekir. Bu kondansatörler çok pahalı olduğu için, aynı işlem düşük çalışma frekanslı kondansatörler ile Şekil 6.8'deki devre ile gerçekleştirilebilir (Hong ve ark., 1999). Şekil 6.8'deki devrede darbe tekrarlama oranı 160 olursa, her bir kondansatör bir saniyede 40 kez deşarj olur. Ardışık şarj ve deşarj devresinin çalışma sırası Çizelge 6.3'de verildiği gibidir.

Çizelge 6.3 : Tristörlerin ateşlenme sırasına göre kondansatörlerin şarj ve deşarjı

Tristörlerin ateşlenme sırası	Şarj olan kondansatör	Deşarj olan kondansatör
Th ₁ , Th ₇	C ₁	C ₃
Th ₂ , Th ₈	C ₂	C ₄
Th ₃ , Th ₅	C ₃	C ₁
Th ₄ , Th ₆	C ₄	C ₂

Çizelge 6.3'de görüldüğü gibi her bir saykılta iki tristör ateşlenmektedir ve devrede bulunan kondansatörlerden biri şarj olurken diğeri ise flaş lambası üzerinden deşarj olmaktadır. Tristörlerin ardışıl şekilde ateşlenmesi mod 2 bir sayıcı ve decoder devresi ile kolayca kontrol edilebilir. Şekil 6.8'deki devre ile yüksek tekrarlama oranlarına düşük frekanslı kondansatörler kullanılarak ulaşılabilir.

Şekil 6.8'deki devrede bulunan tristörler Çizelge 6.4'da verilen ardışık sırada da ateşlenmesi mümkündür. Eğer tristörler Çizelge 6.4'deki ardışık sırada ateşlenecek olursa her bir saykılta iki kondansatör şarj olacak iki kondansatör ise flaş lambası üzerinden deşarj olacaktır. Sonuçta, her bir saykılta lazer çıkışında alınan enerji ikiye katlanacaktır.



Şekil 6.8: Darbeli katı hal lazeri flaş lambasının basitleştirilmiş güç kaynağı ve düşük çalışma frekanslı kondansatörlerle gerçekleştirilen deşarj devresi

Çizelge 6.4 : Tristörlerin ateşlenme sırasına göre kondansatörlerin şarj ve deşarjı

Tristörlerin ateşlenme sırası	Şarj olan kondansatör	Deşarj olan kondansatör
Th ₁ , Th ₂ , Th ₇ , Th ₈	C ₁ , C ₂	C ₃ , C ₄
Th ₃ , Th ₄ , Th ₅ , Th ₆	C ₃ , C ₄	C ₁ , C ₂

Deşarj devresin kullanılan indüktörlerin rezistansı ise mümkün olduğu kadar küçük seçilmelidir. İndüktörün toplam rezistansı flaş lambasının iç direncinin 10'da birinden az olmalıdır. İndüktörlerin içinden çok yüksek değerli akım geçer. Yan yana iki iletken içinden aynı yönde akım akarsa iletkenler bir birini iter (Bayrak 2002). Bu sebepten indüktör sarımları çok sıkı bir şekilde sarılıp iyi bir şekilde sabitlenmelidir.

Gereken indüktör değeri formül 6.20'den belirlenir. Formül 6.20'nin doğruluğu $\frac{2a}{l} < 3$ için geçerlidir.

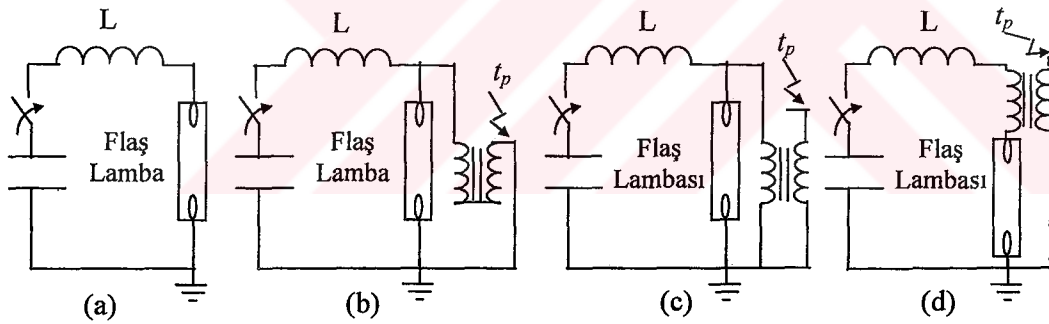
$$L_i = \frac{n_s^2 a^2}{9a + 10l} \quad (6.20)$$

Formülde; L_i : İndüktör (H), n_s : Sarım sayısı, a : Bobinin çapı (inç), l : iletken boyudur.

6.4 Flaş Lambasını Tetikleme Teknikleri

Flaş lambası üzerinden deşarj olacak kondansatörün şarj olduğu gerilim değeri genellikle flaş lambasını ilettime geçirmeye yetmez. Lamba devresi açık devre olduğundan şarj olan kondansatör flaş lambası üzerinden deşarj olamaz. Tetikleme devresi flaş lambasının ilk anda ilettime geçmesi için bir darbe üretir ve lampa içindeki gazın iyonize olmasını sağlar. Flaş lambasının ilettime geçmesi ile birlikte şarj olan kondansatör flaş lambası üzerinden deşarj olur. Harici tetikleme sargısı olmayan flaş lambaları genellikle Şekil 6.9.c ve d'de gösterilen tetikleme devrelerinden biri ile tetiklenir. Flaş lambasını tetiklemek için 15 kV genliğe sahip 100 μ s süreli bir elektrik darbesi yeterli olmaktadır. Flaş lambası aşağıda belirtildiği gibi dört şekilde tetiklenebilir.

- Aşırı voltaj tetiklemeli (Şekil 6.9.a),
- Harici tetiklemeli (Şekil 6.9.b),
- Paralel enjeksiyon tetiklemeli (Şekil 6.9.c),
- Seri enjeksiyon tetiklemeli (Şekil 6.9.d).



Şekil 6.9 : Tetikleme devreleri

Flaş lambasını tetiklemek için Şekil 6.9.d'de gösterilen devre kullanılırsa ve darbe şekillendirici devre olarak RLC devresi seçilmişse, tetikleme devresinin indüktansı RLC devresi için gereken indüktans değerini karşılayabilir. Tetikleme transformatörünün indüktör değeri yaklaşık olarak 100 μ H civarındadır. Çizelge 6.5'te flaş lambası tetikleme modları verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Tetikleme modları

Modu	Ortak elektrot	Güç kaynağının polaritesi	Harici tetikleyicinin Polaritesi	Seri Paralel tetikleyicinin polaritesi
1	Katot	Pozitif	Pozitif	Negatif
2	Katot	Pozitif	Negatif	Pozitif
3	Anot	Negatif	Pozitif	Negatif
4	Anot	Negatif	Negatif	Pozitif

Mod 1 ve mod 3 harici tetiklemeli flaş lambaları için kullanılmamalıdır. Mod 2 ve mod 3 seri tetikleme için önerilmez. Eğer yanlış polaritede bir tetikleme yapılacak olursa nüvenin doyuma gitmesine sebep olunabilir.

Flaş lambasına uygulanacak tetikleme darbesinin süresi flaş lambanın ark uzunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Ark uzunluğunun her cm'sine 60 ns düşecek sürede bir darbe uygulanmalıdır. Flaş lambasını tetiklemek için gereken darbe süresi formül 6.21'den hesaplanabilir.

$$t_{ts} = 60L_a \quad (6.21)$$

Formülde; t_{ts} : Tetileyecek darbenin süresi (ns), L_a : Flaş lambasının ark uzunluğudur.

Tasarlanan devrede kullanılan flaş lambasının ark uzunluğu 6,5 inçtir. Flaş lambasını tetiklemek için gereken darbe süresi;

$$t_{ts} = 6,5 \times 2,54 \times 60 = 990,6ns \cong 1\mu s \text{ dir.}$$

Tasarlanan devrede flaş lambasını ateşlemek için 15 KV ateşleme geriliminin 1μs süre ile uygulanması gerekir. Flaş lambası ilettime geçtiği an devre akımını sınırlandırmak üzere ateşleme devresine seri bir direnç bağlanmalıdır.

Ateşlenen flaş lambasını iletimde tutmak için, ateşleme devresinde bulunan kondansatörün şarj olacağı gerilimin minimum değeri, lambanın ark uzunluğuna bağlı olarak değişir. Eğer kondansatörün şarj voltajı çok düşükse lambada bulunan gazın iyonize olması sağlanamaz. Flaş lambalarında gazın iyonize olması için, lamba

elektrot terminallerine arasına ark uzunluğu 3 inç ise 600 V., 6 inç ise 1 kV, 12 inç ise 1,5 kV gerilimin uygulanması gerekir.

Bu bölümde söz konusu lazer çıkış gücünü elde etmek için etkin bir güç kaynağı tasarımı ve uygulanması Medikal 2000 firmasında gerçekleştirilmiştir (Ek-I). İmal edilen güç kaynağı ile çalıştırılan lazer cihazı çıkışından ölçülen enerji değerleri Ek-II’de verilmiştir.

6.5 Nd:YAG Lazer Cihazlarında Güç Kayıpları

Pompalama lambasından pompalanan fotonlar Nd:YAG lazerden foton enerjisi olarak çıkarlar. Nd:YAG lazerin kuantum verimi % 99.5’e kadar çıkabilir (Kushida 1968). Nd:YAG lazerde meydana gelen güç kayıpları aşağıda verilen gruplara ayrılabilir.

- Besleme kaynağındaki güç kayıpları,
- Flaş lambasındaki güç kayıpları,
- Optik çukurdaki güç kayıpları,
- Lazer çubuktaki güç kayıpları.

Nd:YAG lazerin sürekli dalga çalışma verim denklem 6.22’den hesaplanabilir.

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (6.22)$$

Formülde; P_{out} : Lazer çıkış gücü, P_{in} : Elektrik giriş gücüdür.

Lazer çıkış gücü optik güç metre ile ya da kalorimetre ile giriş gücü ise wattmetre ile ölçülür. Nd :YAG lazerlerin verimi % 1 ila % 5 arasındadır. Sürekli dalga lazerler bazı zaman peryotlarında sürekli çalışırlar anlamındadır. Sürekli dalga lazer verimli olduğu önceden belirlenen bir zaman aralığında çalıştırılır (Trenholme 1987). Bu sürede lazer denge şartlarına ulaşır. Lazer elemanlarının ısısı belli bir sıcaklık değerine ulaşp sabit kalması ile lazer çıkış gücünde belirgin bir değişiklik olmaz. Sürekli dalga Nd:YAG lazerlerin kararlı çalışması durumu için meydana çıkan bütün güç kayıpları önemlidir. Şekil 6.10’da sürekli dalga Nd:YAG lazer için önemli olan bütün güç kayıpları gösterilmiştir.

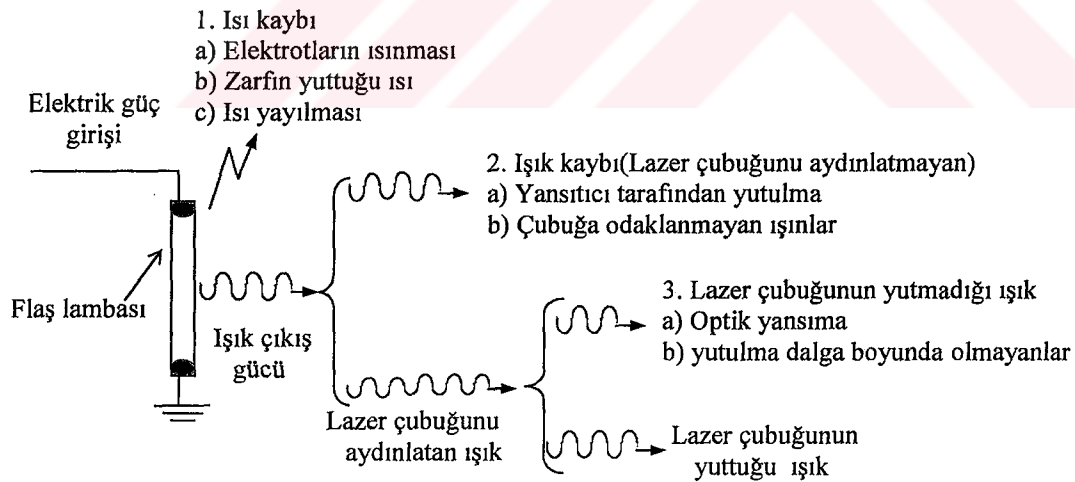
verimi % 30'dan azdır. Eğer gaz tüplü (Ksenon veya Kripton) ise, kaynaktan üç sebepten dolayı ısı ortaya çıkar;

- i) Gazı iyonize edip elektron bombardımanı elde etmek için yüksek akım yoğunluğundan dolayı lamba elektrotlarında meydana gelen ısı,
- ii) Gaz tarafından üretilen ısı,
- iii) Lamba kılıfı tarafından soğurulan ışığın ısıya dönüşmesi.

Sürekli dalga ark gaz lambalarının verimi % 30'dur. Bu lambalar uçlarından hava ya da su dolaştırılarak serinletilir.

6.5.3 Optik Çukurdaki Güç Kayıpları

Lambadan çıkan ışık, her yönde yayılır (Şekil 6.12). Lambadan çeşitli yönlerde yayılan bu ışığı lazer çubuğun merkezine odaklamak için kullanılan yansıtıcıdan tek bir yansıma sonucunda ışığın % 90'ı yansıtılır. Işıkların bazıları beş veya altı yansımadan sonra lazer çubuğa ulaşabilir bazıları ise hiç ulaşamaz. İyi bir yansıtıcının veriminin % 80 civarında olması gerekir (Koechner 1992).



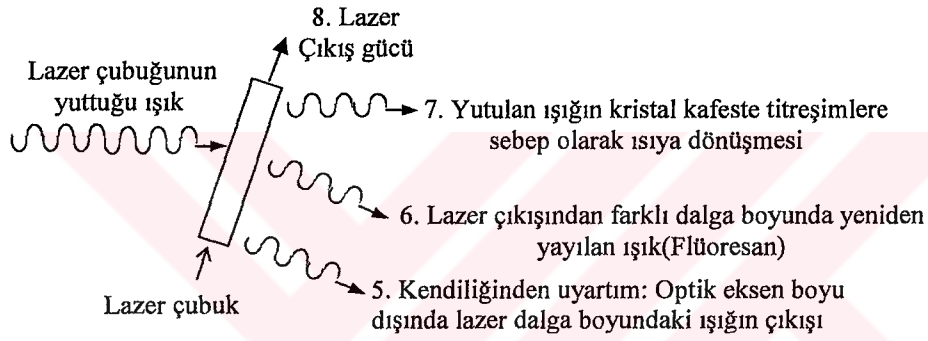
Şekil 6.12: Flaş lambasının güç akış diyagramı

6.5.4 Lazer Çubuktaki Güç Kayıpları

Lazer malzemenin fiziksel yapısında, atomik düzeyde kayıplar meydana gelir. Lazer malzemeden lazer ışının çıkması için, ışığın uyarılmış ışıma bölgesinden faydalanılır. Belli bir dalga boyundaki lazer ışın çıkışı optik eksen boyunca olur.

Lazer çubukta meydana gelen güç kayıpları iki olaydan meydana gelir (Şekil 6.13);

- i) Lambadan çıkan ışık, lazer çubuğun yüzeyine kabul açısından küçük bir değerde çarparsa ışığın önemli bir kısmı çubuğa girmeden yansır,
- ii) Lazer malzemenin özelliğine bağlı olarak yalnızca belirli bir dalga boyu bölgesindeki ışınlar soğurulabilir.



Şekil 6.13: Lazer çubuğun güç akış diyagramı

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Nd:YAG katı-hal lazer materyallerin ürettiği ışının metaller tarafından yüksek oranda yutulmasından, bakım ve ilk yatırım maliyetlerinin düşük olmasından dolayı, materyal işlemede Nd:YAG lazerlerinin kullanımı daha çok tercih edilmektedir.

Bu lazerler, yaygın olarak kalınlığı 0,6 - 1 mm arasında olan saç malzemelerin kaynak yapılmasında etkili ve verimli bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Bu çalışmada, lazerle malzeme işlemenin ortaya koyacağı kalite üstünlüğünü belirleme açısından çözülmesi gereken çok önemli bazı problemler üzerinde durulmuştur. Çözüm getirilen sorunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kaynak yapılma hızının lazer güç yoğunluğuna bağlılığı,
- Belli bir derinlikte kaynak yapabilmek için, minimum enerji tüketimini sağlayan şartların bulunması ve bunların matematiksel olarak ifade edilmesi,
- Gereken lazer cihazının besleme ve kontrol devresinin tasarımının kolaylaştırılması için lazer gücü ile flaş lambasının temel parametreleri arasındaki gerekli ilişkinin bilimsel olarak ortaya çıkarılması.

Kaynak yapmada, kaynak hızı, lazer gücü ve elde edilen kaynak derinliği arasında matematiksel bir ilişki kurulmuştur. Uygulamada yaygın olarak kullanılan anahtar deliği kaynak yöntemiyle, yüksek kaynak hızında ince saçların kaynak yapılması işleminin önerilen ampirik formül ile en ekonomik bir şekilde gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Bu tez çalışmasında, uygulamada karşılaşılan aşağıdaki iki önemli problemin üzerinde hassasiyetle durulmuştur.

- Belli bir materyali istenen bir kaynak derinliğinde kaynatabilmek veya ısıl işleme tabi tutabilmek için, seçilmesi gereken lazer cihazının özellikleri ve gerekli minimum gücünün belirlenmesi,

- Verilen bir materyalin işlenmesinde özel olarak kullanılan belirli özelliklere sahip bir lazer cihazının, başka bir işlem için de kullanılabilirliğinin belirlenmesi.

Ayrıca, lazerle malzeme işlemenin avantaj, kalite ve verimi açısından çok önemli bazı problemler ve çözüm yolları ele alınmış ve çözülmüştür. Bu sorunların başlıcaları;

- 1) Kaynak hızının lazer güç yoğunluğuna bağlılığı
- 2) Belli bir derinlikte kaynak için, minimum enerji tüketimini sağlayan şartların belirlenmesi ve matematiksel olarak ifadelerinin elde edilmesi
- 3) Gereken lazer cihazının besleme ve kontrol devrelerinin tasarımının kolaylaştırılması için lazer gücü ile flaş lambasının temel parametreleri arasında var olan ilişkisinin kesinleştirilmesi.

Bu tez çalışmasında, materyal işleme amaçlı Nd:YAG lazer cihazları için gerekli özel bir kontrol devresi ile güç kaynağının tasarım prensipleri ve metotları üzerinde geniş bir şekilde durulmuş ve tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenerek çözüm yolları gösterilmiştir. Sonuçta, bu elemanların üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve uygulamada kullanılmışlardır (Ek-I). İmal edilen lazer cihazının ve kullanılan fiber optik kablunun verimi hesaplanmıştır. Lazer darbe enerjisinin kondansatör şarj gerilimine bağlı olarak değişimi gösterilmiş ve ölçümlerden elde edilen ve sonuçlar Ek-II'de verilmiştir.

Darbe enerjisi ve darbe süresi lazer cihazının güç kaynağı devresinin tasarımında dikkate alınması gereken iki önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin kabul edilebilir değerlerinde olmaları için, güç kaynağının tasarımında izlenmesi gereken işlemler sırasına dikkat çekilmiş, devre elemanlarının ve parametrelerinin seçimi ile gerekli hesaplamaların yapılmasında nelerin öncelikli olduğuna açıklık getirilmeye çalışılmıştır.

Darbenin tekrarlanma oranını artırmak için yüksek frekanslarda çalışan özel kondansatörler yerine düşük frekanslarda çalışan ve ucuz olan kondansatörlerle deşarj devresi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu devre ile aynı zamanda değişik darbe şekillerini elde etme imkanı da sağlanmıştır. Bu tez çalışması bu konuda yapılan diğer çalışmalardan bu yönleriyle farklılık arz etmektedir.

Tez çalışmasında materyal işleme esnasında karşılaşılabilecek problemler ve çözüm yolları üzerine literatür taraması yapılmış ve elde edilen sonuçlar bir çizelgede verilmiştir (Ek- III). Bu çizelgeye lazerle materyal işlemek için yaptığımız deneyler sonucunda karşılaştığımız önemli sorunlar ve bunların nasıl üstesinden geldiğimize dair bilgiler de ilave edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ülkemizde üretilmiş olan parçaların kullanıldığı tıbbi alanda ve malzeme işlemek üzere tasarlanmış olan lazer cihazlarının ortaya çıkması da ayrıca önem arz etmektedir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar; endüstriyel uygulamalar amacıyla ithal edilen lazer cihazları yerine yerli teknolojiyle tasarlanıp üretilen cihazların kullanılmasının Ülkemize önemli ölçüde döviz tasarrufu sağlayacağı açık bir şekilde göstermiştir. Dolayısıyla, bu yönde yapılacak çalışmaların derinleştirilmesinde, sanayi açısından, büyük yarar vardır.

Ülkemizde henüz şimdiye kadar geniş uygulama alanı bulamamış lazer kaynağının bundan sonra yaygın olarak üretimde kullanıma girmesiyle özel sanayi ürünleri için gereken hassasiyet ve kalite başarılı bir şekilde yakalanabilecek ve bunun bir sonucu olarak da endüstride üretim kalitesi artacak, maliyet düşecektir.

7.2 Öneriler

Uygulamada karşılaşılan en önemli problemlerden biri de, farklı tip malzemelerin bir birine kaynak yapılmasıdır. Farklı tip metallerin aynı kaynak derinliğinde kaynak yapılabilmesi için aşağıdaki yöntemler önerilebilir:

- Farklı, özelliklere sahip olan iki lazer kaynağı belirlenip malzemelerin birleştirilme noktalarına iki farklı güç yoğunluğu uygulamak için kullanılabilirler.
- Tek bir lazer cihazı kullanılarak, lazer demeti bölücüler ile ikiye bölünebilir. Materyallerde aynı kaynak derinliğine ulaşmak için, bu demetlerden her biri, kaynak bölgesine gereken güç yoğunluğunda uygulanabilir.

Her iki kaynak işlemini de gerçekleştirmek için özel ekipman ve cihazlara ihtiyaç vardır. Bu da hem çalışma süresinin artmasına hem de karşılanması mümkün

olmayan ek maliyetlere neden olduğundan tez çalışmasında deneysel olarak gerçekleştirilememiştir.

Denemeler esnasında mika bir malzemeyi kesilmeye çalışılırken, malzemenin yüzeyine hiçbir şey olmamış Fakat malzeme içinde patlamalar gözlenmiştir. Bu olayın neden kaynaklandığı ve niçin böyle bir şey olduğu anlaşılamamıştır. Bu deneme ile lazer ışın demetini geçiren malzemelerin içi böyle bir yöntemle boşaltılıp boşaltılmayacağı konusu gündeme gelmiştir. Çünkü malzemenin her iki yüzeyinde bir bozulma olmadığı halde malzemenin içinde patlamalar sonucunda oluşan boşluklar gözlenmiştir. Bu konu üzerinde çalışılıp araştırılması gerekebilir.

Uygulamada gereken kalitede kaynak elde edebilmek için, bire-bir gerçekleştirilen kaynak kalitesinin izlenmesi de çok önemlidir. Bu tez çalışması sonucunda lazer kaynağında karşılaşılabilecek problemler ve üstesinden nasıl gelineceğine dair elde edilen veriler (Çizelge Ek-III), uzman sistemler ile hazırlanan bir yazılım programında değerlendirilerek kaynak kalitesinin gereken kalitede olması sağlanabilir.

8. KAYNAKLAR

- Abbott, D. H.**, and **Albright C. E.** CO₂ Shielding Gas Effects in Laser Welding Mild Steel, *Journal of Laser Applications*. Vol. 6. pp. 69-80., 1994
- Abdullah, H.A.**, **Siddiqui, R.A.**, Concurrent laser welding and annealing exploiting robotically manipulated optical fibers, *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier Science Ltd., pp.1-12, OLEN 2567, 2001
- Allmen, M.**, "Laser-Beam Interactions with Materials", *Springer Series in Materials Science*, Vol.2, Springer-Verlag, Berlin, 1987
- Anonim**, Hazard Alert for Laser Welders, Cutters, Heat Treaters, and Punch Presses, U.S. Army Center for Health Promotion and Preventive Medicine, pp.1-2, 1995
- 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
- Ashley, S.**, Steel Cars Face a Weighty Decision, *Mechanical Engineering*, Vol. 119. February 1997. pp. 56-61., 1997
- Bagger, C.**, **Olsen F. O.** , Pulsed Mode Laser Cutting of Sheets for Tailored Blanks *Journal of Materials Processing Technology* 115, pp 131-135, 2001
- Bayrak, M.**, *Temel Elektrik ve Magnetizma*, , pp. 62-79, Atlas Yayın Dağıtım, ISBN 975-6574-12-7, 2002
- Beck, T.H.**, **Reng, N.**, **Weber, H.**, "Optical Fibres For Metarial Processing Lasers", *Optics and Lasers in Engineering*, Elsevier, 34, pp. 255-272, 2000
- Beersiek, J.**, **Poprawe R.**, **Schulz W.**, **Gu H.**, **Mueller R.E.**, **Duley W.W.**, "Online Monitoring of Penetration Depth in Laser Beam Welding", *Proc., ICALEO 97*, 1997
- Beersiek, J.**, " On-line Monitoring of Keyhole instabilities during Laser Beam Welding", *Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO 99*, 1999
- Beersiek, J.**, "On-line Monitoring of Key Hole Instabilities During Laser Beam Welding", *Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO'99, Welding Monitor*, 2000

- Bibeau, C.**, et al., "CW and Q-switched performance of diode end-pumped Yb: YAG laser", in OSA Trends in Optics and Photonics, Vol. 10, Advanced Solid State Lasers, C. R. Pollack and W. R. Bosenberg (Egs.), Optical Society of America, Washington, D. C., 276-79, 1997
- Bowman, S. R.**, et al., "Laser and spectral properties of Cr, Tm, Ho: YAG at 2.1. mm", IEEE J. Quantum Electron. 27, 2142-49, 1991
- Brekhovskikh, V.F.**, Kokora, A.N., Uglov, A.A., "Spatial Distribution of Heat Source Intensity in Steel Produced by Laser Beam, Fizika-I Khimiya Obrabotki Materialov, No.6,3-9., 1967
- Brüggeman, G.**, ve ark., "Comparison of Experimental Determined and Numerical Simulated Temperature Fields for Quality Assurance at Laser Beam Welding of Steels and Aluminium Alloyings", NDT&E International, 33, Elsevier, pp.453-463, 2000
- Caird, J. A.**, Payne S. A., "Crystalline paramagnetic ion lasers", in Handbook of Laser Science and Technology. Supplement 1: Lasers, ed. M. J. Weber, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1-99, 1991
- Chen, X.**, Lotshaw W.T., Ortiz A.L., Staver P.R., Erikson C.E., McLaughlin M.H., Rockstroh T.J., Journal of Laser Apply., 8, p.233, 1996
- Du, J.**, "Laser Welding of Ultra Thin Stainless Steel 316L Sheets", Mechanical, Material and Aerospace Engineering in the Colloge of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida, Orlando, 2000
- Duley, W. W.**, Laser Materials Interactions of Relevance to Metal Surface Treatment, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Laser Surface Treatment of Metals. Italy, September 2-13, pp. 3-16., 1985
- Eagar, J.**, Energy Sources Used For Fusion Welding, ASM Handbook Vol. 6., 1995
- Fan, T. Y.**, Byer R. L., Mitzscherlich P., "Spectroscopy and laser diode-pumped operation of Tm, Ho: YAG", IEEE J. Quantum Electron. 24, 924-33, 1998
- Fridenfolk, M.** ve ark., "Simulation Based Design of a Robotic Welding System", Division of Robotics Depertmant of Mechanical Engineering, Lund University, Sweden, pp.1-7, 2002
- Geustic, J.E.**, Marcos H.M., Van Uitert L.G., Apply Physics, Lett. 4, 182, 1964

- Grigoryants, A.G.**, Basics of Laser Material Processing, CRC Press, Boca Raton, FL, Chapter 4, 1994
- Han, W.J.** ve ark., “Welding Characteristics of the Inconel Plate Using a Pulsed Nd:YAG Laser Beam”, Journal of Materials Processing Technology, 113, Elsevier, pp.234-237, 2001
- Haug, K.**, Pristschow G., “Robust Laser-stripe Sensor for Automated Weld-seam-tracking in Shipbuilding Industry”, Institute for Control Technology of Machine Tools and Manufacturing Units(ISW), Seidenstr.36, Paner Id.FU-027, pp. 1-6, 1997
- Havrilla, D.**, "Laser Welding Design and Process Fundamentals and Trouble shooting Guideline/ Technical Report, Rofin-Sinar, Inc., Plymouth, Michigan, 1995
- Honea, E.**, et al., Hing Power Dual Rod Yb: YAG lasers, Opt. Lett.25, 805-7, 2000
- Hong, J-H.**, Park K-R, A New Proposal of High Repetitive Nd:YAG Laser Power Supply Adopted the Sequential Charge and Discharge Circuit, Optics & Laser Technology, 31, pp 397-400, 1999
- Hujii, K.M.**, “The Specific Nature of High Power Nd:YAG Laser for Welding” (ML-2801A), Japanese Laser Association, pp. 13-8, 1991
- Irving, B.**, Lasers: Made in the U.S.A.. Welding Journal, Vol. 71. No. 6. pp. 67-73, 1992
- Jin, X.** ve ark., “A Heat Transfer Model for Deep Penetration Laser Welding Based on an Actual Keyhole”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, Pergamon, pp. 15-22, 2003
- Jin, Z.X.**, Li, J.L., “A Conduction Model for Deep Penetration Laser Welding Based on an Actual Keyhole”, Optics and Laser Technology, 35, Elsevier, pp.5-12, 2003
- Kagan, V.**, Bray R.G.,” Advantages and Limitations of Laser Welding Technology for Semi-Crystalline Reinforced Plastic”, www.honeywell.com., 2002
- Kaierle, J.** Günnewig,R., Rake H., Online Control of Penetration Depth in Laser Beam, IECON 98, 1998
- Kang, D.H.**, Son, K.J., Yang, Y.S., Analysis of Laser Weldment Distortion in the EDFA LD Pump Packaging, Finite Elements in Analysis and Design, 37,pp.749-760, 2001

- Kaparsky, L.N., Kokora A.N., Romaivekkova O.A. ve arkadaşları,** “Effects Produced by Q Switched Laser Pulse on Steel”, *Fizika-i Khimiya Obrabotki Materialov*, No.1.,3-10, 1968
- Kawano, S., Nakahigashi S., Uesugi K., Nakamura H. Kono W.,Fukuya K., Kano F., Hasegawa A., Abe K.,** Weldability of helium-Containing Stainless Steels Using a YAG Laser ,*Journal of Nuclear Materials* 258-263,pp 2018-2022, 1998
- Keller, G.,** Robotic Lasers Drive into the Auto Industry. *Welding Design & Fabrication*. Vol. 67, July 1994. pp. 40-41., 1994
- Keller, U.,** “Materials and new approaches for ultras hort pulse lasers“, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 1,218-24, 1996
- Koechner, W.,** Solid State Laser Engineering, springer-verlag, New York, 1988
- Koechner, W.,** Solid State Laser Engineering, 3rd. Edition, springer-verlag, New York, 1992
- Kogelnik, H.,**” On the propagation of Gaussianbeams of light through lens like media including those with a loss gain variation”, *Appl.Opt.*;4:pp.1562-9., 1965
- Kuhl, K., J.,**”Laser Engineering”, Prentice Hall, 1998
- Kushida, T., J.E. Geusic,** *Phys. Rev. Lett.*, 21,1172, 1968
- Lankalapalli, K.N.,** “ Model Based Penetration Depth Estimation of Laser Welding Processes”, *Industrial Engineering Depertmant, Prudue University*, 1996
- Lancaster, J. F.,***The Physics of Welding* 2nd ed, Oxford, Pergamon Press, pp. 306., 1986
- Laser Focus World,** Welding Research Program Funded, September, p.55., 1996
- Leot,** Course Material, Module 3-3, Energy Transfer in Solid-State Lasers, http://cord.org/cm/leot/course03_mod03/mod03_03.htm
- Leot,** Course CW Nd:YAG lazer systems, Module3.4, http://cord.org/cm/leot/course03_mod03/mod04.htm
- Leot,** Course Material, Module 4-4, Flash Lamps for Pulsed Lasers and Flash Lamp Power Supplies, http://cord.org/cm/leot/course04_mod04/mod04_04.htm
- Li, Z.,Gobbi S.L.,** Laser Welding for Lightweight Structures, *Journal of Materials Processing Technology* 70,pp. 137-144, 1997

- Lin, H. C., Lin K.M., Chuang Y.C., Chou T.S.,** The Welding Characteristics of Fe-30Mn-6Si and Fe-30Mn-6Si-5Cr Shape Memory Alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 306,pp 186-192, 2000
- Mahlke, G. ve Gössing, P.,** Fibre optic cables. New York: John Wiley & Sons, 1987
- Maiman, T.H.,** *Nature* 187,493, 1960
- Martin, B. ve ark.,** "Characterisation of CW Nd:YAG Laser Keyhole Dynamics", *Optics and Laser Technology*, 33, Elsevier, pp.201-207, 2001
- Mazumder, J.,** *Laser Materials Processing*, Edited by M. Bass. North Holland. Amsterdam, pp. 120-124., 1983
- Mazumder, J. ve Kar, A.,** Theory and Application of laser Chemical Vapor Deposition, Plenum Press. New York, pp. 81-84., 1995
- Metzbower, E.A.,** *Laser Beam Welding*, Metal Handbook. Vol 6: Welding, Brazing, and Soldering, 9th Edition, ASM International, Materials Park, Ohio, 1983
- Miller, M. ve ark.,** "Development of Automated Real-Time Data Acquisition System for Robotic Weld Quality Monitoring", *Mechatronics* 12, Pergamon, pp.1259-1269, 2002
- Nath, A.K., Sridhar R., Ganesh and Kaul R.,** "Laser Power Coupling Efficiency in Conduction and Keyhole Welding of Austenitic Stainless Steel", *Sādhana* Vol.27, Part 3, June 2002, pp.383-392, Printed in Indiana, 2002
- Noaker, P. M.,** *Lasers Penetrate Fabricating. Manufacturing Engineering*, October, pp. 33-40, 1993
- Oliver, C., Hilton P, Russell J.** Material processing with a 10kW Nd:YAG laser facility. *Proceedings of the ICALEO'99*, 1999
- Orazio, S., David C. Honna,** Principles of Lasers, Plenum press, New York, ISBN 0-306-42967-5, p.-p.1-13, USA, 1994
- O'Shea, D.C., W.Russell and Rhodes, William T.,** Introduction to Lasers and Their applications. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1978
- Page, R. H., et al.,** "1-watt composite-slab Er: YAG laser", in *OSA Trends in Optics and Photonics*, Vol. 10, Advanced Solid State Lasers, C. R Pollack, and W. R. Bosenberg (Eds.), Optical Society of America, Washington, D. C., 214-16, 1997

- Park, H., Rhee S.**, "Estimation of Weld Bead Size in CO₂ Laser Welding by Using Multiple Regression and Neural Network", *Journal of Laser Application* Volume 11, Number 3, pp.143-150, 1996
- Park, W.Y. ve ark.**, "Real Time Estimation of CO₂ Laser Weld Quality for Automotive Industry", *Optics and Laser Technology*, Elsevier, 34, pp.135-142, 2002
- Payne, S. A., et al.**, "Diode arrays, crystals and thermal management for solid-state lasers", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* 3,71-81, 1997
- Przetakiewicz, W. ve ark.**, "Analysis of a Temperature Distribution of a Laser Welding of Metals", *Biuletyn WAT VOL. XLIII*, No 7-8, pp. 105-114, 1994
- Ready, J.F.**, *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, Inc., 2002
- Roessler, M.D.**, *Industrial Laser Annual Handbook* (ed. by D. Belforte and M. Leoitt), Pern Well Bodis Tuba, pp. 16-30, 1986
- Roessler, M.D.**, *High-Power Lasers in Materials Processing-an Automotive Perspective*, *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on High Power Lasers-Science and Engineering*, Ed. R. Kossowsky, M. Jelinek and R. Walter. Czech republic, July 1995. pp. 463-504, 1996
- Rykalin, N. N.**, "Raschety Teplovykh Protsessov Pri Svarke Lazerom", *Theory of Thermal Processes in Welding*, Mashgiz, Moscow, 1951
- Rykalin, N., Uglov, A. ve Kokora, A.**, *Laser Machining and Welding*, Çeviri Glebov, O., Mir Puplicher, Moscow, 1978
- Salminen, A. S. ve Kujanpaa. V. P.**, *Effect of Heat Input on the Position Tolerances of Wire Feeding during Laser Welding*, *Proce. of the 1995 International Conference on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'95)*, Ed. by J. Mazumder, A. Matsunawa and A. Magnusson, San Diego, pp. 534-543, 1995
- Schoenbeck, R.J.**, "Electronic Communications", Merril Publishing, Co.Columbus., 1988
- Schubert, E. ve ark.**, "Light-weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry", *Journal of Materials Processing Technology* 115, pp.2-8, Elsivier, 2001

- Schuöcker**, D., "Mathematical Modeling of Laser-assisted Deep Drawing", Journal of Materials Processing Technology, 115, Elsevier, pp.104-107, 2001
- Shawlow**, A. L., "Laser Light," Sci. American, September , 120-126, 1968
- Shimoda**, K., Introduction to Laser Physics, 2nd edition, Springer Ser. Optic Science, Vol.44, Springer, Berlin, Heidelberg, 1986
- Silfvast**, T. W., Laser Fundamentals, Cambridge University Press, U.K., 1999
- Sirohi**, R.S., Basic Theory of Laser Technology, pg 206, Laser and Plasma Technology, Proceedings of 1984 tropical College on Applied Physics Department, University of Malay, Kuala Lumpur, Malaysia, 1984
- Sokolov**, A. V., Optical Properties of Metals. Translated by Chomet, S.. Elsiver, New York, English edition, 1967
- Sorokin**, P.P., Stevenson M.J., Physics Revision Lett. 5, 557, 1960 and Advances in Quantum Electronics, Colombia University, Press, New York P.65, 1961
- Stalder**, M., Chai B. H. T., Bass M., "Flash lamp pumped Cr: LiSAF laser", Appl. Phys. Lett. 58, 216-18, 1991
- Steen**, W. M., Laser Materials Processing. 2nd edition, London Springer-Verlag, pp.206, 1998
- Timothy**, M.W., "Nd: YAG Laser With Controlled Pulse Shape", In: Proc. Of LAMP, pp. 75-80, 1987
- Trenholme**, J.B., Laser Program Annual Report, UCRL-50021-86, Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1987
- Wang**, J., Olesan H. And Stubkjaer K.E., "Recombination, Gain and Bandwidth Characteristics of 1.3 μ m Semiconductor Laser Amplifiers", IEEE J. Lightwave Technol., LT-5, No. 1, pp.184-189, 1987
- Wilson**, J., Hawkes J.B.F, Laser Principles and Applications, Prentice Hall International, UK, 1987
- Xie**, J. and Kar A., Melting and Vaporization for Large-area Film Removal with a Chemical Oxygen-iodine Laser. Journal of Applied Physics, Vol. 82, No. 10. pp. 4744-4751, 1997
- Xie**, J., "Laser Welding of Sheet Metals", Mechanical, Material and Aerospace Engineering in the College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida, Orlando, 1998

- Yadong, W.**, Koundidinya H., Pei, W., Josephine, L., Keat, P., “Characterization of Flash Lamps for Pumping Solid State Lasers”, <http://sci.nie.edu.sg/ckplee/cv/friends/terpo01/peiyadongharishjoe.htm>, 2002
- Yamamoto, Y.**, and Mukai T., “Fundamental of Optical Amplifiers”, Opt. Quantum Electron., QE-21 pp. S1-S14, 1989
- Yariv, A.**, Optical Electronics, 3rd edn., Holt, Rinehart and Winston, New York, Chapters 9 and 12, 1985
- Yariv, A.**, Quantum Electronics, 3rd edn., John Wiley and Sons, New York, 1989
- Yilbaş, B.S.** ve ark., “Heat Transfer Analysis of Laser Heated Surfaces Conduction Limited Case”, Applied Surface Science, 108, Elsevier, pp. 167-175, 1997



EK- I Medikal 2000 Firmasında Tibbi Alanda Kullanılmak Üzere İmal Edilen Lazer Cihazı

Medikal 2000 firmasının istekleri doğrultusunda Rus bilim adamları (Victor Sharkov, Tatiana Soloviova, Aleksander Shakadorovitch, Vladimir Kalinov) ile ortak çalışılarak imal edilen lazer cihazının özellikleri şunlardır.

Lazer ortamı: Nd: YAG Katı hal lazer çubuk (Çubuk çapı $1 \cong \text{cm}$), % 1.1 Nd atomları ile dopyinglenmiş

Dalga boyu : 1064 nm

Elde edilebilecek darbe enerjisi: 50 mJ'dan 1 J'a kadar 50 mJ'luk adımlarla

Darbe tekrarlama oranı : 1 ila 60 arasında

Darbe süresi : 20 μs .

Pompalama tipi: Flaş lambası ile optik olarak

Kullanılan flaş lambası : Ksenon gazlı, ark uzunluğu 7,5 cm, çapı $\cong 1 \text{ cm}$.

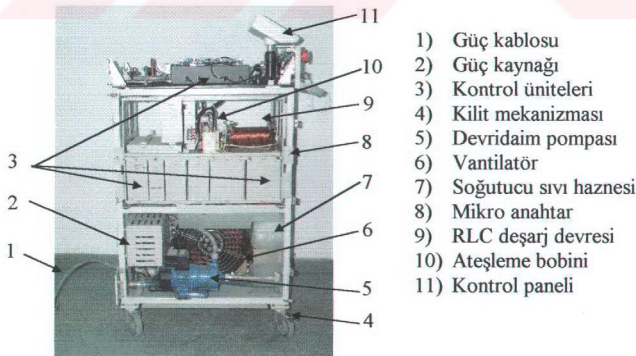
Flaş lambasının ömrü : 50.000 ila 500.000.000 darbe

Soğutma tipi : Sıvı (saf su) soğutmalı

Lazer cihazının toplam gücü : 2,4 kW

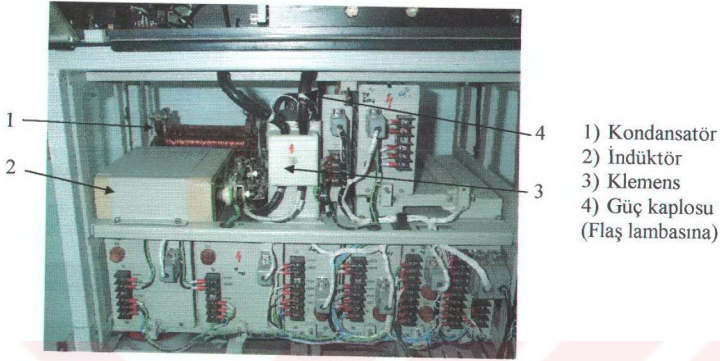
Lazer demetinin taşınması : 0,6 mm çapında çok modlu cam fiber optik kablo

İmal edilen lazer cihazının yandan görünüşü Şekil 1'de verilmiştir.



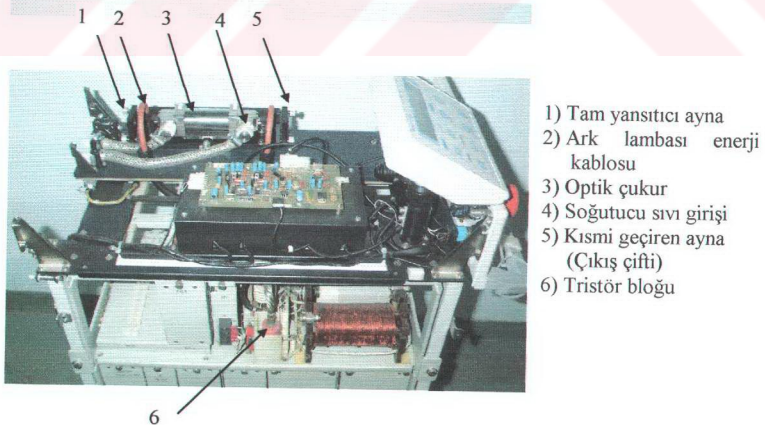
Şekil 1. : Medikal 2000 firmasında üretilen lazer cihazının yan görünüşü

Şekil 2’de deşarj ünitesi ve bu üniteyi oluşturan elemanlar görülmektedir.



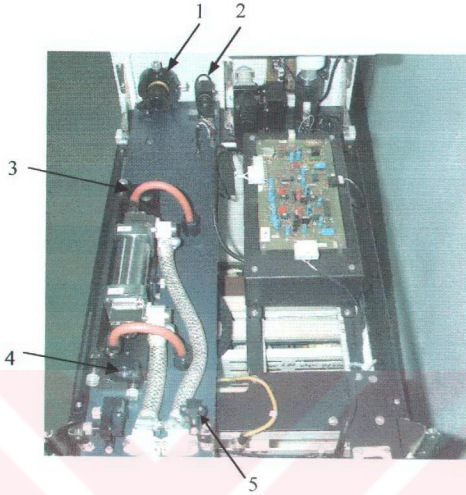
Şekil 2. : RLC deşarj devresi elemanlarının yerleştirilme şekli

Şekil 3.’de Optik çukur ve çevre elemanları görülmektedir. Optik çukur içinde flaş lambası ve lazer çubuk yerleştirilmiştir. Flaş lambasından çıkan ışık enerjisinin lazere dönüşmeyen kısmı ısı enerjisine dönüşmektedir. Optik çukurda ortaya çıkan bu ısı soğutma sıvısı ile optik çukurdan uzaklaştırılmaktadır.



Şekil 3. : Optik çukur ve elemanlarının yerleştirilme şekli

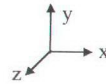
Şekil 4 'de optik çukurun farklı bir açıdan çekilen görüntüsü görülmektedir.



- 1) Lazer ışınına fibere odaklama düzeneği
- 2) Kılavuz lazer ışını (He-Ne)
- 3) Kısmi geçiren ayna
- 4) Tam yansıtan ayna
- 5) Kılavuz ışını yönlendiren prizma (45°)

Şekil 4. : Optik çukurun farklı bir açıdan görünümü

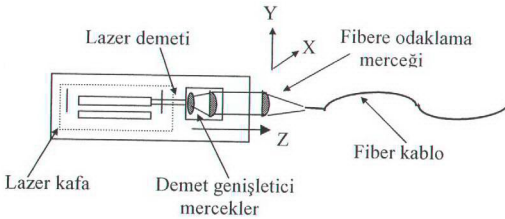
Şekil 5.'de lazer ışının fiber optik kablunun içine odaklayan aparat görülmektedir. Bu aparatın içinde üç adet mercek vardır. İki tanesi demet genişletici için bir tanesi de genişletilen demeti fiberin içine odaklamak için kullanılmaktadır.



- 1) Z ekseninde demet genişletici mercekleri hareket ettiren düzeneç
- 2) Odaklama merceğini y ekseninde hareket ettiren düzeneç
- 3) Odaklama merceğini x ekseninde hareket ettiren düzeneç

Şekil 5. : Lazer ışınına fiber optik kabloya odaklayan aparat

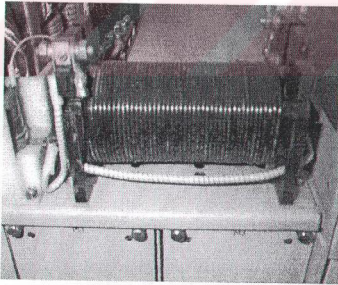
Şekil 5'deki düzende lazer ışının fiber optik kablo içine odaklanması Şekil 6.'da gösterildiği gibi olmaktadır.



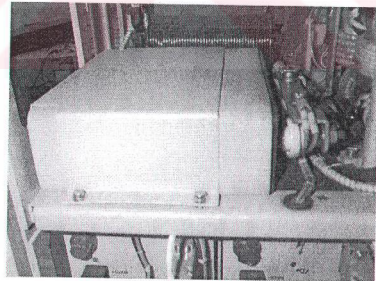
Şekil 6. : Lazer kafadan elde edilen lazer ışın demetinin fiber ile taşınması

Lazer cihazında fiber optik kabloya lazer ışını odaklayan mercek takımı takılı değilken lazer ortamdan cihaz dışına çıkan lazer demetinin çapı 500 mJ, 1 Hz. çalışma şartlarında 0,2 mm, 500 mJ, 30 Hz., için 0,4 mm, 1000 mJ, 30 Hz, için 0,6 mm olarak ölçülmüştür.

Şekil 7.a'da RLC deşarj devresinde kullanılan indüktör, Şekil 7.b'de ise RLC deşarj devresinde kullanılan kapasitör görülmektedir.



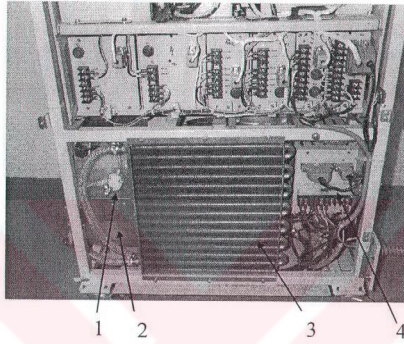
(a)



(b)

Şekil 7. : RLC deşarj devresinde kullanılan a) İndüktör b) Kapasitör(100µF, 1500 V.)

Şekil 8’de lazer cihazına içinde soğutucu sıvısının bulunduğu kabın ve kondanser panelinin yerleştirilme şeklinin görüntüsü verilmiştir. Kondanser paneli lazer kafada oluşan ve sistemde uzaklaştırılması gereken ısıyı havaya aktarma işini gerçekleştirmektedir.



- 1) Akış kontrol algılayıcısı
- 2) Soğutucu kabı
- 3) Kondanser
- 4) Güç kaynağı

Şekil 8. : Lazer cihazının arka panel görüntüsü

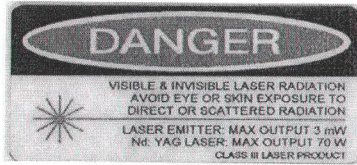
Şekil 9’da lazer cihazının ön panel görüntüsü verilmiştir.



- 1) Acil durdurma butonu
- 2) Ana şalter
- 3) Fiber kabloya bağlantı konnektörü
- 4) İkaz etiketi

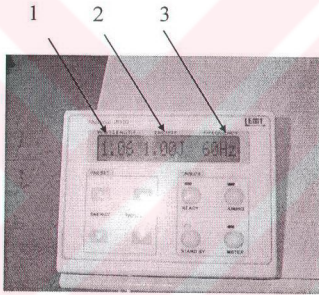
Şekil 9. : Lazer cihazının ön panel görüntüsü

Şekil 10.'da İmal edilen lazercihazının güvenlik etiketi ve içerdiği bilgiler görülmektedir.



Şekil 10. : Lazer emniyet etiketi

Şekil 11.'de lazer cihazının kontrol panelinin görüntüsü verilmiştir.



- 1) Lazer ışınının dalga boyu
- 2) Darbe enerjisi
- 3) Darbenin tekrarlanma oranı

Şekil 11. : Lazer cihazının kontrol paneli görüntüsü

Çizelge 1. Lazer demet çapının elde edilen enerjiye göre değişimi

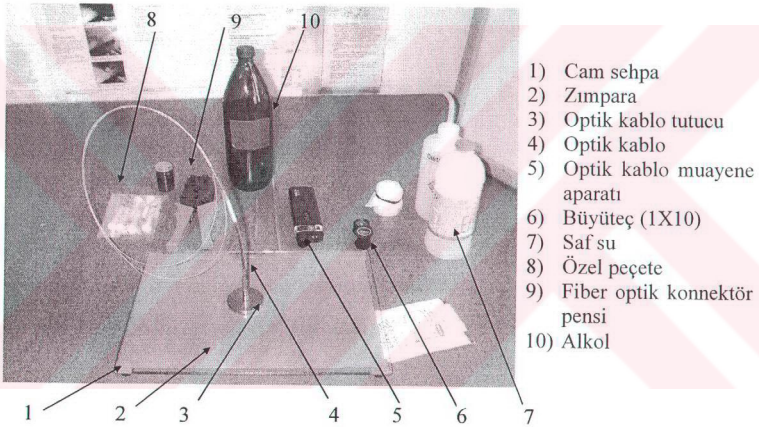
Lazer enerjisi	Darbenin tekrarlanma sayısı	Lazer demetinin çapı
500 mJ	1 Hz	0,2 mm
500 mJ	30 Hz	0,4 mm
1 J	30 Hz	0,6 mm

Çizelge 1.'de görüldüğü gibi lazer darbe enerjisi ve darbe tekrarlama oranı arttıkça lazer ortamdan çıkan lazer demetinin leke çapı artmaktadır.

Fiber çıkışındaki yüzeyin hazırlanması fiberin zarar görmesi ile yakından ilgilidir. Fiber yüzeyinin dikkatsizce hazırlanması fiberin zarar görme eşliğini

düşürür. Çapı 500 μm 'nin üzerindeki optik fiberler farklı tipteki kesiciler ile kesildikten sonra otomatik veya el yardımı ile fiber yüzeyi parlatılabilir. Yalnızca fiber çapı 500 μm 'nin altındaki fiberler sonradan parlatmaya gerek kalmaksızın kesilebilirler. Fiber sonundaki yüzeyin hazırlanmasının iletim özellikleri üzerinde bir etkisi yoktur. Lazer demetinin fibere girdiği yüzeyin parlatılarak hazırlanması ve yüzeyin düzlemsel olması çok önemlidir. Düzlemsel yüzeydeki herhangi bir bağlama şartlarındaki değişme etki açısından θ_{max} 'ın -% 7 azalmasına sebep olabilir.

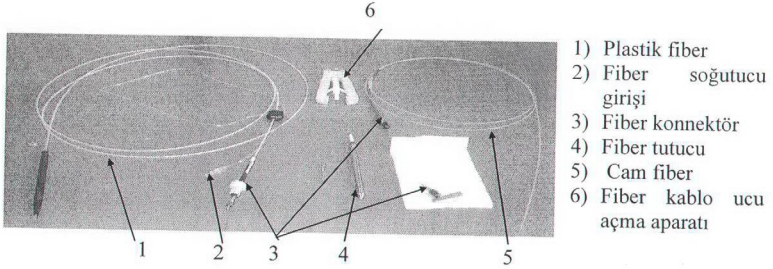
Şekil 12.'de fiber optik kabloyu elle hazırlamak için gerekli seti oluşturan elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 12. : Fiber optik kablo hazırlama seti

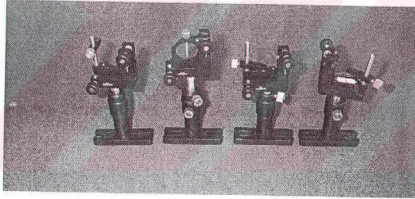
Şekil 13.'de çeşitli tip fiber optik kablolar ve fiber optik kaplo açma aparatı gösterilmiştir. Lazer ışın demetinin taşınmasında kullanılan plastik fiberlerde enerji kaybı, cam fiberlerden fazladır. Plastik fiberlerde meydana gelen enerji kayıpları fiber optik kablonun ısınmasına sebep olmaktadır. Fiber kablonun ısınması iletim kayıplarının artmasına sebep olmaktadır. İletim kayıplarının artmasını önlemek için oluşan ısının fiber optik kablodan uzaklaştırılması gerekir. Koruyucu kılıf ile palastik

fiber arasına açılan bir kanaldan hava yada sıvı pompalanarak fiberde oluşan ısı uzaklaştırılır.

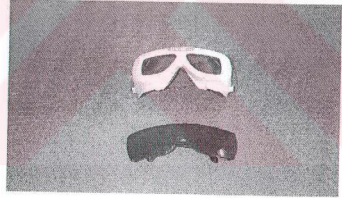


Şekil 13. : Fiber optik kablolar ve aparatları

Şekil 14.a'da denemeler esnasında kullanılan mercek tutucular ve Şekil 14.b'de ise lazer emniyet gözlükleri gösterilmiştir.



(a)

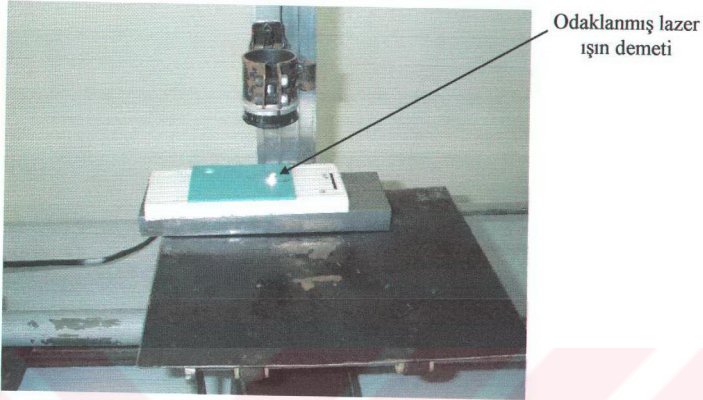


(b)

Şekil 14. a) Mercek tutucular b) Emniyet gözlükleri

Şekil 15.'de lazer ile malzeme işlemek üzere tasarlanan, yalnızca x ekseninde hareket edebilen düzenek görülmektedir. Şekil 15'de mercek tutucu aparatlar x,y,z ekseninde kolayca hareket ettirilebilecek şekilde imal edilmiştir. Demet genişletici merceklerin odak uzaklığı + 6,75 cm dir. Fiber kablo demet genişletici merceğe +6.75 cm uzakta olacak şekilde yerleştirilmiştir. Demet genişletici ikinci mercekte birinci merceğe 6.75 cm uzağa yerleştirilmiştir. Odaklama merceğinin odak uzaklığı ise + 9 cm dir. Lazer ile işlenecek malzeme odaklama merceğinden + 9 cm uzakta

Şekil 17’de plastik bir iş parçasının kesilmesi işlemi görülmektedir.



Şekil 17. : Plastik bir parçanın lazer ışın demeti ile kesilmesi

Plastik parçayı kesme işlemi esnasındaki işlem parametreleri; Odak leke çapı 0,71 mm, darbe enerjisi 700 mJ , darbe süresi 200 μ s, darbe tekrarlanması 40 dir.

Malzemeye uygulanan gücün tepe değeri;

$$P_p = 700 \cdot 10^{-3} / 20 \cdot 10^{-6} = 35 \text{ kW}$$

Uygulanan güç yoğunluğunun tepe değeri

$$I_p = 35.000 / (2 \cdot \pi \cdot (0,071/2)^2) = 0,42 \times 10^7 \text{ w/cm}^2 \text{ dir.}$$

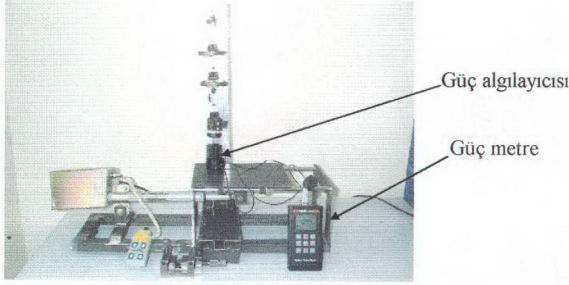
Malzemeye uygulanan ortalama güç ise;

$$E_{avg} = 700^{-3} \cdot 20^{-6} \cdot 40 = 0,56 \text{ mJ} \quad P_{avg} = 0,56 \cdot 40 = 22.4 \text{ W}$$

malzemeye uygulanan ortalama güç yoğunluğu ise;

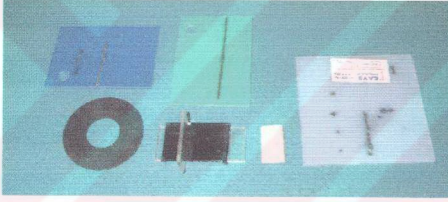
$$I_{avg} = 22,4 / (2 \cdot \pi \cdot (0,071/2)^2) = 2,82 \cdot 10^3 \text{ w/cm}^2 \text{ dir.}$$

Şekil 18’de lazer ışın demetinin gücünü ölçmek üzere kullanılan güç metre ve düzeneğe bağlanması gösterilmiştir.



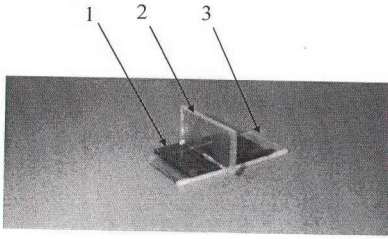
Şekil 18. : Güç metre ile lazer ışın demeti gücünün ölçülmesi

Şekil 19'da çeşitli tip plastik malzemelerin lazer ışın demeti ile kesilme denemesinde kullanılan numune malzemeler görülmektedir.



Şekil 19. : Plastik parçalarının lazer ışın demeti ile kesilme denemeleri

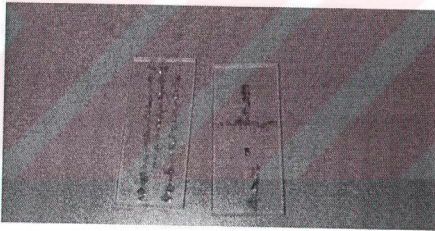
Şekil 20.'de ise Plastik malzemelerin lazerle kaynatılması denemesi görülmektedir. 1 nolu malzeme alından 2 nolu malzemeye kaynatılmıştır. 1 nolu malzeme lazer demetini geçirmekte 2 nolu malzeme ise, lazer demetini yutmaktadır. 2 nolu malzeme eriyerek 1 nolu malzemeye kaynatılmıştır. 3 nolu malzemede ters tarafından 2 nolu malzemeye kaynatılmıştır. Bu uygulamada odak leke çapı 1,4 mm, darbe enerjisi 600 mJ, darbe süresi 20 μ s, darbe tekrarlanma sayısı 30 dur.



- 1) Işığı yutan malzeme
- 2) Işığı geçiren malzeme
- 3) Işığı geçiren malzeme

Şekil 20. Üç adet plastik malzemenin birbirine kaynatılması

Deneler esnasında Şekil 21’de görüldüğü gibi ışın demetini geçiren bir malzemenin içinde patlamalar oldu. Bu deneme şöyle gerçekleştirilmiştir. Malzemenin altına ışığı büyük oranda yansıtan (beyaz renkli) bir plastik malzeme konmuştur. Lazer ışın demeti malzeme yüzeyine odaklanmıştır. Malzeme sehpa üzerinde hareket ettirilirken Şekil 21.’de görüldüğü gibi içinde patlamalar olmuştur. Fakat malzemenin her iki yüzeyinde herhangi bir patlama, bozulma olmamıştır.



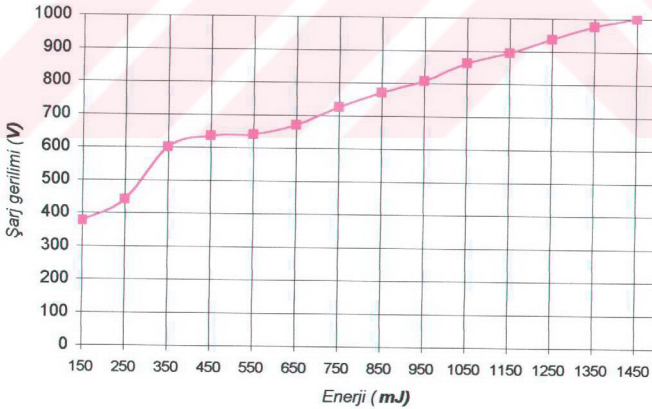
Şekil 21. : Plastik bir parça içinin lazer ışın demeti patlatılması

Bu deneme bizde şöyle bir düşüncenin oluşmasına neden oldu. Acaba lazer ışın demeti ile bir parçanın yüzeyine zarar vermeden içi boşaltılabilir mi? Bu olayın neden kaynaklandığını ve niye meydana geldiğini anlayamadık. Bu denemeyi şunun için yapıyorduk. Acaba giden bir lazer ışını ile gelen bir lazer ışını bir noktada karşılaşırsa ne olur?

Ek – II. İmal Edilen Lazer Cihazına Ait Enerji Ölçüm Değerleri

Çizelge 1. : Lazer çıkışında alınacak enerji için kondansatörün şarj olması gereken gerilim değeri

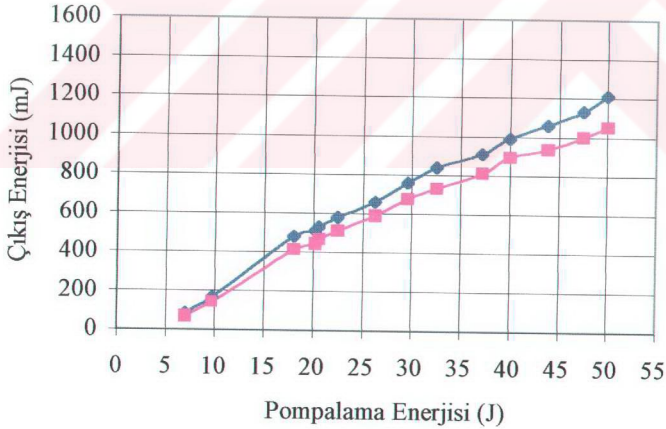
Tablo Enerji (mJ)	Kondansatör şarj gerilimi (V.)
150	375
250	440
350	600
450	635
550	640
650	670
750	725
850	770
950	806
1050	862
1150	894
1250	937
1350	975
1450	1000



Şekil 1. : Elde edilecek enerji çıkışına karşı kondansatörün şarj olması gereken gerilim değeri

Çizelge 2. : Kondansatörün şarj enerjisine bağlı olarak lazer çıkışı ve fiber kablo çıkışından elde edilen enerji değerleri

Tablo Enerji (mJ)	Kondansatör şarj Gerilimi (V.)	Kondansatör Enerjisi (J)	Lazer çıkışı (mJ)	Fiber çıkışı (mJ)
150	375	7	85	70
250	440	9,7	165	140
350	600	18	480	410
450	635	20,2	510	445
550	640	20,5	530	465
650	670	22,4	580	510
750	725	26,3	660	590
850	770	29,6	760	675
950	806	32,5	840	730
1050	862	37,2	910	810
1150	894	40	990	895
1250	937	43,9	1060	935
1350	975	47,5	1130	1000
1450	1000	50	1210	1050



Şekil 2. : Pompalama enerjisine bağlı olarak lazer ortam ve fiber optik kablo çıkışında enerji değişimi

Çizelge 2. : Lazer ortamın ve fiber optik kablunun % verimi

Kondansatör Enerjisi (J)	Lazer çıkışı (mJ)	Fiber çıkışı (mJ)	Lazer verimi (%)	Fiber verimi (%)
7	85	70	1,214286	82,35294
9,7	165	140	1,701031	84,84848
18	480	410	2,666667	85,41667
20,2	510	445	2,524752	87,2549
20,5	530	465	2,585366	87,73585
22,4	580	510	2,589286	87,93103
26,3	660	590	2,509506	89,39394
29,6	760	675	2,567568	88,81579
32,5	840	730	2,584615	86,90476
37,2	910	810	2,446237	89,01099
40	990	895	2,475	90,40404
43,9	1060	935	2,414579	88,20755
47,5	1130	1000	2,378947	88,49558
50	1210	1050	2,42	86,77686

EK-III Lazer Kaynağı Esnasında Karşılaşılabilecek Teknolojik Problemler

Çizelge Ek-III : Lazer kaynağında karşılaşılabilecek problemler ve neden kaynaklandığı

Karşılaşılan problem	Sorun	Çözüm
Kaynak derinliğinin aniden kaybolması	Güç Kaybı	Güç ayarını kontrol et
		Dahili güç metreden lazer çıkış gücünü oku
		Odak noktasından çıkan gücü harici bir güç metre ile ölç
		Eğer odak lensinde bir güç kaybı var ise; odaklama lensini kontrol et kirli ise temizle, hasar görmüşse yenile, sağlam ise demet bölücü mercekle zarar görmüş olabilir yada optik fiber yüzeyi zarar görmüştür. Önemli Not: Lazer cihazına bağlanan fiber optik kablo konektörü gevşek olabilir mutlaka iyi bir şekilde sabitlenmeli.
	Eğer cihaz ile harici bir güç metreden ölçülen güç değerleri aynı ise, Flaş lambaya uygulanan gerilimin değerini artırıp lazer çıkış gücünün artıp artmadığına bakın. Fiber kayıplarını göz önüne alıp güç değişiminin normal olup olmadığına bakın. Eğer normal ise güç kaynağında veya güç kaynağını kontrol eden devrelerde bir sorun olabilir.	
	Kaynak hızının aniden artması	Hız kontrol ünitesini kontrol et
	Odaklama merceği ışın demetini odaklayamıyor	Odaklama lensi kırılmıştır. Yenisi ile değiştir.
	İş parçası odak dışında (Güç yoğunluğu azalırken leke çapı artıyor)	Odak merceği ile iş parçası arasındaki mesafeyi kontrol et.
		Eğer yansımaya karşı korumalı odak merceği kullanılmışsa kaplama kalınlığını da göz önüne alarak odak uzaklığını tekrar kontrol et.
	Metalde üzerinde enerji eşleştirilmesinde değişime oluyor.	Metal yüzeyinin parlatılmasını kontrol et.
		Eğer malzeme yüzeyi herhangi bir madde ile kaplı ise kaplama kalınlığını kontrol et.
Aşamalı olarak kaynak derinliğinin azalması	Optik merceklerin kirlenmesi malzemeye uygulanan gücü azaltıyor.	Odaklama merceğinin koruma penceresini yenile.
		Odaklama merceğindeki gücü kontrol et. Eğer düşüğe yansıtıcı aynalar ve fiberi kontrol et.
	Ayarlamaların değişimi	Fiberden önceki ve fiber çıkışındaki gücü ölç. Eğer aradaki fark %10'dan fazla ise fiber montaj ayarlamalarını kontrol et. (Fiber kabloya konektör iyi şekilde montaj edilmemişse fiberin çekirdeği kılıf ile konektör arasında ileri geri hareket edebilir. Konektörü yenile.)
		Rezanatör çıkışında demet profilini kontrol et. Eğer rezanatör çıkışında demet şekli bozuksa yeniden ayarla ve ışın demetinin düzgün şekilde fibere odaklanmasını sağla.
	Flaş lambasının(ark) yaydığı ışının kademeli olarak azalması	Kontrol et . Lambayı sil gerekli ise yenisi ile değiştir.

Çizelge Ek III'in devamı

Karşılaşılan problem	Sorun	Çözüm
Dikiş kaynağı esnasında kaynak derinliğinin kademeli olarak değişmesi ve plazma buharı parlaklığının artması	Odak noktası merceklerin ısınması yüzünden değişmektedir.	Merceklerin temizliğini kontrol et. Özellikle iletim mercekleri ve koruma penceresini kontrol et.
	Yanlış gaz kullanımı veya yetersiz gaz akışı	Kullanılan gaz tipini kontrol et Kullanılan gaz akışını kontrol et
Aşırı derecede etrafa kaynak sıçraması	Güç çok yüksek	Lazer güç ayarını kontrol et. Harici bir güç metre ile lazerin güç ayarını kontrol et.
	Kaynak hızı azalmıştır.	Kaynak hızını kontrol et.
	Lazer ışın demetinin malzeme ile eşleşmesi artmıştır.	Malzeme yüzeyini kontrol et. Boyanmış, yağlanmış, oksitlenmiş veya harici bir kaplama içerebilir. Malzeme yüzey sertliği kısmi olarak değişiyor olabilir kontrol et.
Kaynak yüzeyinde oyuk oluşması ve kaynağın gözenekli olması	Koruyucu gaz akışı metal dışına doğrudur.	Kaynak gazı akışını kontrol et. Eğer meme yukarıda ise aşağıya indir. Gaz akış deliklerini kontrol et. Meme deliğinde bulunan bir engelleme gaz akış hızını artırır.
	Yetersiz gaz koruması (Malzemenin kaynak bölgesinde renk değişimi, oksitlenme)	Gaz akışı oranı ve koruyucu gazı tipini kontrol et
	Çelik malzemenin çok fazla oksijen içermesi.	Malzeme özelliklerinin değişip değişmediğini kontrol et. Eğer gerekirse malzemenin kimyasal özelliklerini analiz ettirin.
	Kaynak işlemine başlamadan önce malzeme yüzeyini kontrol edin.	Kaynak yüzeyinin temiz olması durumunu kontrol et.
	Malzeme içeriğinden gaz çıkışı olması durumu.	Kurşun ve kalay gibi elementleri içerip içermediğini kontrol et.
	Kaplama kalınlığının artması	Özellikle kurşun kaplamalı malzemelerde kaplama kalınlığındaki değişimi kontrol et.
Kaynak kırıkları	Malzeme değişimi	Malzeme özelliğini kontrol et. Malzemenin içerdiği karbon, sülfür, fosfor arttığı için meydana gelebilir.
	Parçanın yanlış sabitlenmesi	Parça toleransını kontrol et. Malzemenin katılaşması esnasında gerilme değişimleri sonucu oluşabilir.