

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

**SU JETİ DESTEKLİ LAZER SİSTEMİNİN İŞLEM
KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ÜRGÜPLÜ

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL

Ocak 2016

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

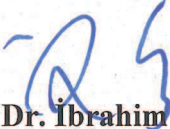
**SUJETİ DESTEKLİ LAZER SİSTEMİNİN İŞLEM
KALİTESİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ÜRGÜPLÜ

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 21 / 01 /2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ
Jüri Başkanı


Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL
Üye


Prof. Dr. İbrahim OKUR
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Mustafa ÜRGÜPLÜ

21.01.2016

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans öğrenimim boyunca bana her türlü desteği vermekten kaçınmayan ve yaptığım bu çalışmada tüm bilgi ve tecrübeleriyle katkıda bulunan tez danışmanım Sn. Doç. Dr. Sakıp KÖKSAL'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince maddi manevi her türlü destek ve imkânlarını esirgemeyen Berisa Lazer Sistemleri Elektrik Elektronik Optik San. ve Tic. Ltd. Şti. yöneticisi Ali BAKKAL'a ve tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince hep yanımda olan ve destek veren aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
LAZERLER.....	5
2.1. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi	5
2.1.1. Dalga boyları ve lazerin yeri	7
2.2. Lazerin Tarihçesi	7
2.3. Lazer Çeşitleri.....	8
2.3.1. Optik pompalamalı lazerler	8
2.3.2. Sıvı lazerler.....	9
2.3.3. Boyar maddeli lazerler.....	9
2.3.4. Gaz lazerler.....	9
2.3.5. Dinamik gaz lazerleri.....	10
2.3.6. Kimyasal lazerler	11
2.3.7. Yarı iletken lazerler.....	11

2.3.8. Serbest elektron lazerleri	12
2.4. Endüstriyel Lazer Türleri.....	12
2.4.1. Karbondioksit (CO ₂) lazeri.....	12
2.4.2. Nd:YAG lazeri	13
2.4.3. Fiber lazerler.....	14
2.5. Lazer Işını İle Kesme ve Delme	14
2.5.1. Lazer ışını ile kesme	16
2.5.1.1. Lazer ile süblimleştirerek kesme	16
2.5.1.2. Lazer ile yakarak kesme.....	18
2.5.1.3. Lazer ile ergiterek kesme	19
2.5.2. Lazer ışını ile delme	20
2.5.3. Lazer ışını ile kesmenin avantaj ve dezavantajları	21
2.6. Lazer İle Kesme İşlemlerinde Kesim Kalitesine Etki Eden Parametreler.....	22
2.6.1. Işın parametreleri.....	23
2.6.1.1. Lazer çıkış gücü ve yoğunluğu	23
2.6.1.2. Işın kalitesi	23
2.6.1.3. Dalga boyu	24
2.6.2. Malzeme parametreleri	25
2.6.2.1. Termal özellikler.....	25
2.6.2.2. Fiziksel özellikler.....	26
2.6.3. İşlem parametreleri.....	26
2.6.3.1. Sürekli dalga (CW) ve darbeli lazer gücü (P).....	26
2.6.3.2. Merceğin odaklama mesafesi	27
2.6.3.3. Malzeme yüzeyine bağlı odak pozisyonu	29
2.6.3.4. Kesme hızı.....	29
2.6.3.5. İşlem gazı ve gaz basıncı.....	30
2.6.3.6. Ağızlık çapı ve dikine mesafesi	31
2.6.3.7. Ağızlık hizası.....	32

BÖLÜM 3.

OPTİK ESASLAR.....	34
--------------------	----

3.1. Lazer Kesim Makinelerinde Optik Esaslar	34
3.1.1. Yansıma.....	34
3.1.2. Işığın kırılması	35
3.1.3. Aynalar ile ışığın yönlendirilmesi.....	36
3.1.4. Prizmalar ile ışığın döndürülmesi.....	36
3.1.5. Cam fiber optik.....	37
3.1.6. Mercekler.....	37
3.2. Lazer Işığının Malzeme Kesme İşlemi Esnasındaki Geometrisi	38
3.3. Işığın Suda Kırılma Prensipleri	40
3.3.1. Fiziksel olgu	40
3.3.2. Kırılma yasaları	41
3.3.3. Işığın yansıması	43
3.3.4. Kritik açı ve toplam iç yansıma	43
 BÖLÜM 4.	
LAZER MİKROJET TEKNOLOJİSİ.....	45
4.1. Lazer Mikrojet Teknolojisi.....	45
4.2. Mikrojet Teknolojisinde Kullanılan Lazer Üretici.....	47
4.3. Mikrojet Teknolojisinde Stabil Su Jeti Uzunluğu.....	49
4.4. Mikrojet Teknolojisinde Malzeme Kesimi Uygulamaları	51
4.4.1. Stentler.....	51
4.4.2. Elmas kesimi	52
4.4.3. Saat parçası işleme uygulamaları	53
4.4.4. Yakıt püskürtme deliği uygulamaları.....	54
4.5. Su Jeti Destekli Lazer Yönteminin İmalatta Sağlayacağı Avantajlar ...	55
 BÖLÜM 5.	
MATERYAL, YÖNTEM VE BULGULAR	59
5.1. Sistemin Amacı.....	59
5.2. Sistemde Kullanılan Parçaların Tanıtılması.....	61
5.2.1. Su pompası	63
5.2.2. Lazer üretici	64

5.2.3. Su jeti başlığı	64
5.3. DeneySEL Sonuçlar	66
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	80



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	: Işın gelme açısı
a_y	: Işın yansıma açısı
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
b	: Görüntü uzaklığı
C	: Işığın boşluktaki hızı
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
CW	: Sürekli dalga
D	: Delik çapı
DF	: Döteryum flüorür
d_f	: Lazer ile kesim için gerekli güç yoğunluğunun oluşturulduğu çap
E_1	: Birincil enerji düzeyi
E_2	: İkincil enerji düzeyi
f	: Odak mesafesi
g	: Sanal uzaklık
H	: Malzeme kalınlığı
HF	: Hidrojen flüorür
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
kW	: Kilowatt
Laser	: Uyarılmış radyasyon yayılımı ile ışığın güçlenmesi
Maser	: Uyarılmış radyasyon yayılımı ile mikrodalgaın güçlenmesi
n_1	: Birinci ortam
n_2	: İkinci ortam
Nd:YAG	: Neodimyum katkılı itriyum alüminyum granat
nm	: Nanometre
PLC	: Programlanabilir mantıksal denetleyici

PMMA	: Poli(metil metakrilat)
T	: Atomun kendiliğinden foton yayımlaması için geçen süre
Tem	: Lazer ışınının enine profili
V	: Işığın malzemedeki hızı
Zf	: Odaklanan ışığın malzemedeki kesme yapabilecek uzunluğu
μm	: Mikrometre
λ	: Dalga boyu
ϕ	: Ayna açısı



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Lazer ışın demetlerinin odaklama işlemindeki davranışı.....	2
Şekil 2.1. Kendiliğinden ve uyarılmış yayımlama	5
Şekil 2.2. Lazer tüpünün yapısı.....	6
Şekil 2.3. Lazerin ışığın dalga boyları arasındaki yeri	7
Şekil 2.4. Yarı iletken lazer; a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Lazer oluşumu	11
Şekil 2.5. Lazer kesme kafasının şematik şekli	15
Şekil 2.6. Lazer-süblimleştirme kesme sistemi.....	18
Şekil 2.7. Lazer ışını ile malzeme delme işlemi.....	20
Şekil 2.8. (a) Sürekli dalga lazeri ve (b) Darbeli lazer kesimi karşılaştırması.....	27
Şekil 2.9. Keskin bir köşede darbeli kesim etkisi	27
Şekil 2.10. Lazer ışığının odaklanması	28
Şekil 2.11. 2 KW CO ₂ lazer için kesme hızı grafiği. Yumuşak çeliğin kesiminde yardımcı gaz olarak oksijen kullanılmıştır. Paslanmaz çeliğin kesiminde yüksek basınçlı (20 bar) nitrojen kullanılmıştır.....	31
Şekil 2.12. Ağızlık geometrisi ve tanımlamaları.....	32
Şekil 2.13. (a) Lazer ışını ve gaz jetinin dengeli konumlandırılması durumu (b) Ağızlık ve lazer ışını kayık eksenli olma durumu	33
Şekil 3.1. Düzlemsel aynada ışığın yansıması	35
Şekil 3.2. Konveks mercek ile ışın taşınımı, 1: paralel ışın, 2: odak noktası ışını, 3: orta nokta ışını, f:odak noktası, g:sanal uzaklık, b:cismin uzaklığı, B:cismin büyüklüğü.....	37
Şekil 3.3. Lazer ışığının odaklanması	39
Şekil 3.4. Günlük yaşantımızda sıkça karşılaştığımız bir kırılma olayı.....	40
Şekil 3.5. Işının kırılma parametreleri.....	42
Şekil 3.6. Düzgün yansıma ve dağınık yansıma	43
Şekil 3.7. Kritik açı ve tam yansıma	44

Şekil 4.1. Daniel Colladon'un akışkan ışık tüpü.....	46
Şekil 4.2. Su jeti destekli lazer sisteminin çalışma prensibi	47
Şekil 4.3. Suyun farklı dalga boylarında lazer ışınıni soğurma miktarı.....	48
Şekil 4.4. Farklı su jeti çapları için stabil su jeti eğrileri.....	50
Şekil 4.5. A) Çap ölçüsü: 20µm, kenar kalitesi zayıf, yüzey pürüzlülüğü yüksek delik görüntüsü, B) Çap ölçüsü: 50 µm, keskin kenarlı, yüzey pürüzlülüğü düşük delik görüntüsü.....	51
Şekil 4.6. A) Geleneksek kuru lazer ile kesilmiş stent görüntüsü B) Lazer mikrojet yöntemi ile kesilmiş stent görüntüsü.....	52
Şekil 4.7. A) Geleneksel kuru lazer ile oluşturulmuş ve ilave taşlama işlemi gerektiren V tipi kerf boşluğu B) Su jeti destekli lazer yöntemi ile 25 mm derinliğe kadar paralel bir şekilde oluşturulmuş kerf boşluğu.....	53
Şekil 4.8. Lazer mikrojet ile kesilmiş saat ibresi görüntüsü	54
Şekil 4.9. Su jeti destekli lazer teknolojisi ile delinmiş ve 30 µm çap ölçüsüne sahip yakıt püskürtme deliği.....	54
Şekil 4.10. A) Elektro erozyon yöntemi ile delinmiş yakıt püskürtme deliği, B) Su jeti destekli lazer ile delinmiş yakıt püskürtme deliği.....	55
Şekil 4.11. A) Geleneksel lazer kesim yönteminde sınırlı en-boy oranı, B) Su jeti güdümleme yöntemi.....	56
Şekil 4.12. A) Geleneksel yöntemde meydana gelen geniş ısıdan etkilenen bölge, B) Su jeti güdümleme yönteminde meydana gelen dar ısıdan etkilenen bölge.....	57
Şekil 4.13. Su jeti destekli lazer yönteminde ergimiş metalin basınçlı su jeti ile kesme bölgesinden uzaklaştırılması.....	57
Şekil 5.1. Lazer ışınının odaklanması ve saçılması.....	60
Şekil 5.2. Deney düzeneği.....	62
Şekil 5.3. Deney düzeneği şematik görünüm.....	62
Şekil 5.4. Sumak SM-15 modeli preferikal pompa basınç-debi değerleri	63
Şekil 5.5. 20W Fiber lazer üretici.....	64
Şekil 5.6. Su jeti başlığı kesit görünüşü	65
Şekil 5.7. A) Su jeti destekli lazer ile yapılan atışların odak mesafeleri, B) Geleneksel kuru lazer yöntemiyle yapılan atışların odak mesafeleri	67

Şekil 5.8. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f) : 63,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 68 mm.....	67
Şekil 5.9. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f) : 65,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 70 mm.....	68
Şekil 5.10. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f) : 67,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 72 mm.....	68
Şekil 5.11. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz çapı değerlerinin grafiksel gösterimi.....	70
Şekil 5.12. Lazer iz derinliği.....	70
Şekil 5.13. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz derinliği değerlerinin grafiksel gösterimi.....	71
Şekil 5.14. A) Geleneksek kuru lazer yöntemi iz formu incelemesi, B) Su jeti destekli lazer yöntemi iz formu incelemesi.....	72
Şekil 5.15. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz formundaki maksimum düzensizlik değerlerinin grafiksel gösterimi	73

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Karbondioksit (CO ₂) ve Nd:YAG lazerinin karşılaştırılması	14
Tablo 3.1. Yaygın kullanılan malzemelerin kırılma indisleri	41
Tablo 5.1. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz çapı değerleri.....	69
Tablo 5.2. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz derinliği değerleri.....	71
Tablo 5.3. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz formundaki maksimum düzensizlik değerleri.....	72
Tablo 5.3. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz formundaki maksimum düzensizlik değerleri.....	72

ÖZET

Anahtar kelimeler: Lazer, Değişken Odak mesafesi, Su Jeti GÜdümlü Lazer

Lazer teknolojisi uzun yıllardır birçok sektörde önemini gün geçtikçe arttırarak, kullanım alanlarını genişletmektedir. Birçok alanda faaliyet gösteren bu teknoloji, kullanıldığı sektörlerde alternatiflerini geride bırakmayı başarmıştır. Lazer teknolojisi ile malzeme kesim kalitesini iyileştirmek için pek çok ar-ge faaliyeti gerçekleştirilmektedir.

Lazer kesim işlemlerinde ışığın doğru yöne aktarılması ve doğru mesafeye odaklanması en önemli aşamadır. Odak noktasının farklı malzeme kalınlıklarına bağlı değişimi imalatta zaman kayıplarına neden olmaktadır. Bunun yanında kesilebilecek malzeme çeşitliliğini sınırlandırmaktadır. Bununla ilgili her ne kadar üç eksenli makineler üretilse de bu sorun tam anlamıyla çözülememektedir.

Bu çalışmada bu soruna çözüm getirebilmek için toplam iç yansıma olgusundan yararlanılmıştır. Bu bağlamda ışın bir su jeti içerisinde güdümlenerek, odak noktasından sonra tekrar açılması engellenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla bir su jeti başlığı tasarlanmış ve lazer ışını bu başlık ile küçük çaplı bir su jeti içerisine odaklanmıştır. Su jeti vasıtasıyla güdümlenmiş lazer ışını ile polimetilmetakrilat malzeme yüzeyine farklı odak mesafelerinden atışlar yapılmıştır. Mikroskop ile bu atışların bıraktığı izlerin boyutları ölçülmüş ve geleneksel kuru lazer ile karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem için üç farklı odak mesafesi kullanılmıştır. Geleneksel yöntemde kullanılan odak mesafesi değerleri 63,5 mm, 65,5 mm, 67,5 mm'dir. Su jeti güdümlü lazer yönteminde kullanılan odak mesafesi değerleri 68 mm, 70 mm ve 72 mm'dir. Odak mesafesinin artışına bağlı iz çapında meydana gelen büyüme konusunda su jeti güdümlü yöntem ile %5-33 oranında iyileşme sağlanmıştır. Su jeti güdümlü sistemle elde edilen iz derinliğinde %5-70 oranında değişen bir artış sağlanmıştır. Ayrıca iz formunun daireselliğinde % 51-70 oranında iyileşme olduğu belirlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE EFFECT TO PROCESSING QUALITY OF WATER JET GUIDED LASER SYSTEM

SUMMARY

Keywords: Laser, Variable Focus Length, Water Jet Guided Laser

Laser technology has expanded its area of utilization in several sectors and gaining increased importance each year. This technology managed to take precedence over its alternatives in the areas whereby it is utilized. A great deal of research and study are performed to improve the quality of material cutting with laser technology.

One of the most important stages in the laser cutting process is the effective transmission and focusing to the correct distance on the material. Changes in focal point due to varying material thicknesses cause non-favorable effect on the quality of work-piece and loss of time in manufacturing. Although three axis laser cutting machines are manufactured, this matter can not be resolved entirely.

In this study, focal depth of the laser beam has been extended by means of guiding it thorough a water jet. For this purpose, a testing apparatus has been set up. A water-jet head is designed and the laser beam has been focused into water-jet by this head. Marking processes have been performed by laser shots on the surface of polymethylmethacrylate material from different focal distances. Then, the marks made by laser beam has been measured and compared with that of traditional dry laser. Three different focal distances are used for both methods. Focal length values used in the conventional method are 63,5 mm, 65,5 mm and 67,5 mm. Focal distance used for the water jet guided laser method are 68 mm, 70 mm and 72 mm.

Improvements of %5-70 were achieved in the size, depth and roundness of marks on the workpiece by using water jet guided laser.

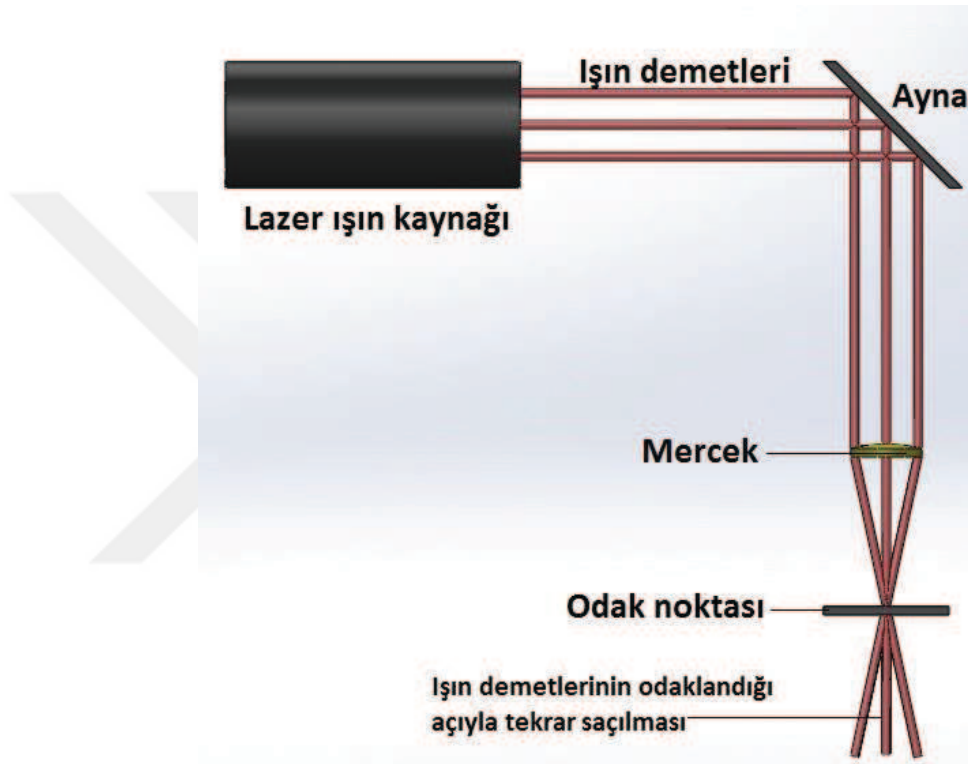
BÖLÜM 1. GİRİŞ

Lazer icat edildiği ilk günden bu yana insan hayatında önemini günden güne arttırarak, yaşantımızın vazgeçilmez bir unsuru olma yolunda hızla ilerlemektedir. Özellikle endüstri alanında her geçen gün yaygınlaşmaya, farklı süreçlerde kullanılmaya başlanmıştır. Lazerin endüstriyel önemi her şeyden önce onun sıra dışı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Kesme, markalama, delme, kaynak, sertleştirme, alıştırma, kaplama ve ergitme gibi lazer ışını ile gerçekleştirilen işlemlerde geleneksel yöntemlere göre çok büyük üstünlükler sağlanmaktadır. Ayrıca söz konusu işlemlerin çok geniş bir malzeme yelpazesinde gerçekleştirilebilir olması da, lazerin endüstrideki önemini daha da arttırmaktadır [1].

Bu çalışmada lazer ile malzeme kesimi işleminde meydana gelen lazer ışığının odaklama problemlerine ve odaklamanın konik bir şekilde gerçekleşmesinin malzemenin kesiminde ortaya çıkardığı sorunların çözümü için yeni bir odaklama sistemi üzerine çalışılmıştır. Öncelikle lazerin odaklanması işleminin nasıl gerçekleştirildiğinin iyi bilinmesi gerekir.

Lazer ışını, ışın kaynağından birbirine paralel olan demetler halinde çıkar. Bu ışın demetleri belirli bir çapa ve dalga boyuna sahiptir. Bir merceğe paralel olarak gelen ışınların, mercekten geçip kırıldıktan sonra merceğin öte yanında birleştikleri nokta odak noktası olarak adlandırılır ve kesme işleminin en iyi yapıldığı nokta da bu noktadır. Sanayide kullanılan bir lazerde, demetin zaten yüksek yoğunlukta enerjiye sahip olması nedeniyle, kesme işlemi odak noktasından uzakta da gerçekleştirilebilir [2]. Lazerin ışın demetlerinin bu prensibe göre odaklanması bir takım sorunları da beraberinde getirmektedir. Farklı malzeme kalınlığı için yeni bir odak noktası gerekmektedir. Yüzeyi düzlemsel olmayan, farklı formlara sahip parçaların kesiminde ise kesme işlemi boyunca odak mesafesi ayarının değiştirilebilmesi

gerekmektedir. Odak mesafesinin kesme işlemi esnasında da otomatik olarak yapılabilmesi için mesafe algılayıcıları, PLC yazılımı, servo motor ve sürücüsü kullanılmak zorundadır. Algılayıcılardan gelen devamlı bilgi akışı PLC ile sürücülere aktarılır. Fakat yine de ışının odak noktasının devamında tekrar saçılmasının sonuçları kaçınılmaz bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.1’de lazer ışınının odaklama prensibi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Lazer ışın demetlerinin odaklama işlemindeki davranışı

Lazer ışınının odak noktasından sonra tekrar saçılmasının sonucu olarak ışın çapı giderek artacaktır. Malzeme kalınlığı arttıkça ışın çapının artması kerf aralığında genişlemeye, deformasyona ve kesme işleminde zorluklara sebep olur. Kerf aralığından konik biçimde geçen ışın kesim yüzeyinin paralellliğini bozar ve kesim yüzeyinin eğimli hale gelmesine neden olur.

Bu çalışma kapsamında ışın demetlerinin odak noktasından itibaren tekrar açılmasını önlemek için su jeti destekli lazer teknolojisinden yararlanılmıştır. Bu amaçla temel fizik kanunlarından yararlanılmış ve ışınların çok yoğun ortamdan az yoğun ortama

geçerken tam yansıma yapması ilkesine dayanarak lazer ışınları küçük çapta ve düşük basınçlı bir su jeti içerisine odaklanmıştır. Işının suyun dışına çıkması toplam iç yansıma sayesinde engellenmiş ve böylece lazer ışını su jeti ile kesim bölgesine güdümlenmiştir. Güdümlü lazer ışını malzeme üzerine farklı odak mesafelerinden gönderilmiştir. Işının yüzeye temas ettiği alanda bıraktığı etkinin farklı mesafelerde değişim oranları incelenmiştir.



BÖLÜM 2. LAZERLER

Bu bölümde lazerler hakkında genel bilgiler verilecektir. Lazerin tanımı, tarihçesi, çeşitleri vb. konular üzerinde durulacaktır.

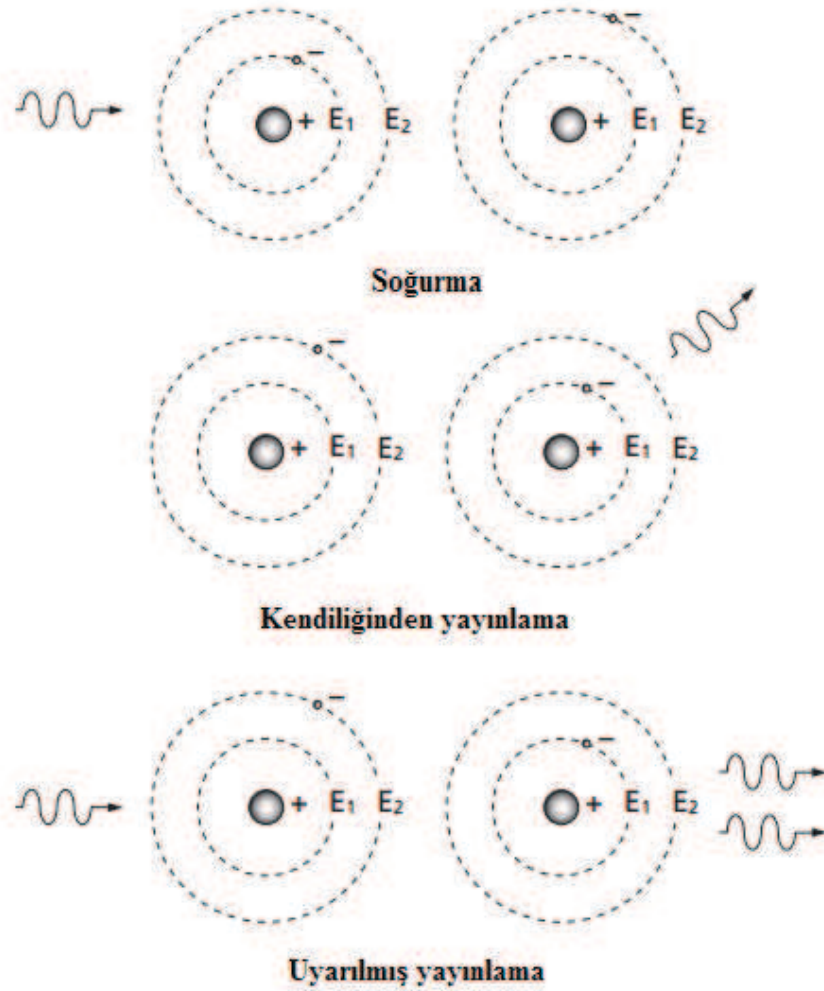
2.1. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi

LASER, akronim yazım kuralı ile Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation cümlesindeki baş harflerden elde edilmiş olup, “uyarılmış radyasyon yayılımı ile ışığın güçlenmesi” olarak tercüme edilebilir [1]. Her hangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları birçok enerji düzeyi içerir ve bu enerji düzeyleri arasında gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar ve soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye teşvik edilebilir ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur [3].

Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır; yani o elementteki atomların elektronları kararlı yörüngeleri olan belli bir enerji düzeyinde bulunurlar. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkarak tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjiyi dışarı salma işlemi lazerin ana prensibini oluşturmaktadır [3].

Genellikle bir atom uyarılmış bir enerji durumunda iken, kısa bir süre sonra düşük enerji durumuna geçiş yapar ve bu esnada ışıyım fotonu yayımlanabilir. Bu olay kendiliğinden uyarılma olarak adlandırılır. Foton rastgele bir yönde ve rastgele bir evrede yayımlanır. Düşük enerji durumuna geçme olayının gerçekleşmesi için

gerekli ortalama zaman kendiliğinden uyarılma için gerekli bir zaman sabiti olarak adlandırılır ve τ ile sembolize edilir [4].



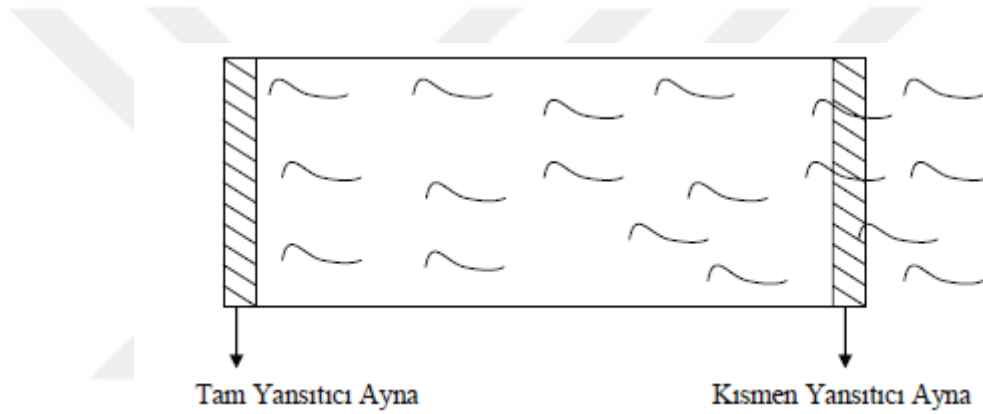
Şekil 2.1. Kendiliğinden ve uyarılmış yayımlama [4]

Diğer yandan eğer bir elektron E_2 enerji düzeyinde ve onun düşük enerji düzeyi E_1 ise, bu durumda bu elektronun kendiliğinden foton yayımlama şansı bulunur; bir foton yaklaşık olarak enerjisi $E_2 - E_1$ kadar olan bir geçiş meydana getirir. Bu şekilde yayımlanan her bir foton diğer bir elektroni uyararak aynı evrede, aynı dalga boyunda ve aynı yönde hareket eden yeni fotonlar açığa çıkaracaktır. Bu işlem uyarılmış yayımlama olarak adlandırılmaktadır. Soğurma, kendiliğinden yayımlama ve uyarılmış yayımlama şekil 2.1’de gösterilmektedir. Soğurma olayı ise düşük

enerjili atomun foton soğurarak yüksek enerji düzeyine geçmesidir. Bütün bu süreçler kabaca aşağıdaki eşitlikteki (Denklem 2.1) gibi ifade edilebilir. Burada E_1 düşük seviyeli atomun enerjisini, E_2 yüksek seviyeli atomun enerjisini ve E ise foton enerjisini ifade eder.

$$E = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

İşte lazerin elde edilmesi bu prensibe dayanarak optik olarak saydam bir lazer tüpü içerisinde gerçekleşir. Lazer tüpünün bir ucunda tam yansıtıcı ayna, diğer bir ucunda ise kısmen yansıtıcı ayna mevcuttur.

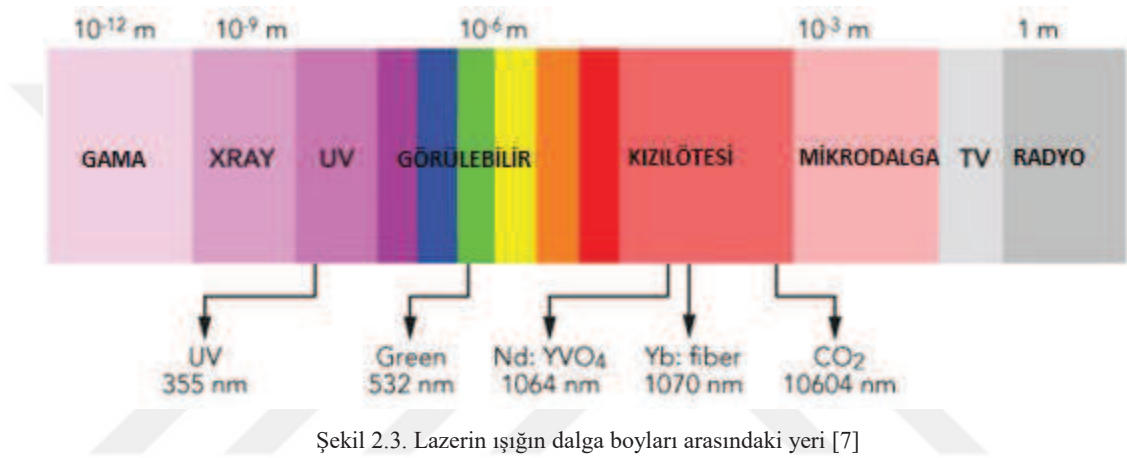


Şekil 2.2. Lazer tüpünün yapısı [5]

Lazer tüpünün içerisi katı, sıvı veya gaz bir madde ile doludur. Lazer tüpüne dışarıdan enerji verilerek ortamda bulunan atomlara ulaştırılır. Lazer tüpüne dışarıdan enerji verme olayı ortamdan elektrik akımı geçirme veya dışarıdan ışık geçirme şeklinde gerçekleştirilebilir. Atomların bir kısmı bu enerjiyi soğurur. Fazla enerji atomları kararsız bir hale getirir. Kararsız uyarılmış haldeki atomlara çarpan fotonlar sonucu bu atomlar da foton yayarlar ve kararlı hale geçmeye çalışırlar. Yayılan bu fotonlar tüpün içerisindeki aynalardan yansıtılarak geri döner ve reaksiyonu hızlandırır. Uyarılmalar sonucu ortamdaki fotonlar artar. Atomların büyük çoğunluğunun foton yaymasıyla kuvvetlenen ışık kısmen yansıtıcı aynalı uçtan dışarı çıkar. Foton enerjisi ile kuvvetlenip dışarıya çıkan bu ışık lazer ışınıdır [6].

2.1.1. Dalga boyları ve lazerin yeri

Elektromanyetik radyasyonlar uzayda sinüzoidal yayılım yaparlar. Sinüzoidal dalga örüntüsünün tekrarlanan birimleri arasındaki mesafeye dalga boyu denir. Ses dalgaları gibi ışık dalgalarının da boyu, genliği ve frekansı vardır. Işık bu parametrelere göre sınıflandırılır. Şekil 2.3'te lazer ışığının dalga boyları arasındaki yeri gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Lazerin ışığın dalga boyları arasındaki yeri [7]

2.2. Lazerin Tarihçesi

Lazerlerin tarihi Alman asıllı Amerikalı fizikçi Albert Einstein (1879-1955) ile başlamıştır. Einstein 1917 yılında, "Işımanın Kuantum Kuramı" başlığını taşıyan ve uyarılmış salınım olayını ilk kez açıklayan bir makale yayınlamış fakat bu ve diğer çalışmalarından ortaya çıkabilecek herhangi bir uygulamadan söz etmemiştir [2].

Lazerin ilk icadı; ilk kez A.L. Schawlow ve C.H. Townes tarafından 1958'de "Infrared and Optical Masers" adlı yayınlı maser kelimesi ile tarif edilmiştir. Maser atomların dışarıdan uyarılması neticesinde dışarıya salınan radyasyon yardımı ile elde edilen, genliği yükseltilmiş elektromanyetik dalgadır. İlk maserin mikrodalga frekansında çalışması sebebiyle İngilizce (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) cümlesindeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiştir. Çok çeşitli, uyumlu ve tek renk ışık elde etmek amacıyla optik

düzenekler maserdir. Optik frekanslarda çalışan bu sistemler ise optik maser veya lazer olarak adlandırılır.

Yakut lazeri ilk olarak Maiman tarafından 16 Mayıs 1960'da sonuç raporları olarak yayınlanmıştır. 1961 yılında Sorokin ve Stevenson U:CaF₂ lazeri ile ilgili çalışmalarını yayınlamıştır [8]. Mathias 1963'te N₂ lazerini, 1964'te Geusic YAG (iterbiyum alüminyum granat) lazerini, Bridges Ar-iyon lazerini bulmuştur [9].

1970 yılında CO ve H₂'nin O₂ ile yanarak CO₂ ve H₂O açığa çıkarmasıyla ışıma yapan ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, eksimer ve diyot lazerleri geliştirilerek lazer teknolojisi bugün savunma sanayiinden endüstriye, tıp alanından, haberleşme, bilgisayar ve hatta eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır [9].

2.3. Lazer Çeşitleri

2.3.1. Optik pompalamalı lazerler

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyatarak yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından biri lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olduğundan güçlü bir pompalama gerçekleşmesi gerekir [10].

Optik pompalamalı lazerde uygun malzemeden yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve lazer ışığının yansıyabilmesi için ayna ile kaplanmıştır. Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli modda çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığın bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. İlk yapılan lazerde yapay bir

yakut kristali (safir, alüminyum oksit) olan pembe yakut kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimyumdur. Bu tür lazerden çok güçlü, binlerce watt değerinde güçler elde edilebilir [10].

2.3.2. Sıvı lazerler

Katı lazerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılma ve hasar ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camsı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (örn. neodimyum oksit ya da neodimyum klorürün oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istendiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi olanaklı olur. Fakat inorganik sıvıların pek azı lazerlerde kullanılmaya elverişlidir [10].

2.3.3. Boyar maddeli lazerler

Etkin ortam sıvı çözelti halindeki organik moleküllerden oluşur. Bu moleküller görünür veya mor ötesi ışıkla uyarıldıklarında 100 nm veya daha büyük bir tayf olabilirler. Özel düzenekler sayesinde (yansıtıcı Ag ve dağıtıcı prizma) yayılım dalga boyu seçilebilir. Bu tür lazerlerde uyarılma kısa darbeleri flaş veya kısa dalga boylu lazer ışıması ile optik yolla yapılmaktadır. Her boyar maddeye özgü farklı bir alanın varlığı ve boyar maddenin kendi aralarında değiştirilebilmeleri sayesinde aynı cihaz 300 nm'lik dalga boyundan büyük bir alanda yayılım yapabilir [1].

2.3.4. Gaz lazerler

Bu tür lazerlerde etkin ortam çoğu kez bir gaz karışımından oluşur. Karışımındaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla diğerine aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte, helyum-neon lazerleridir [1].

İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan gaz lazerleridir. En yaygın olanı argon lazeridir. Argon atomları, bir elektrik boşalmasının elektronları ile

çarpışarak iyonlaşır. Bu lazerler ile çok sayıda tayf çizgisi elde edilir (mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496,5 nm ve 514,5 nm). Yayımlanan güç yüksek olup onlarca watt değerindedir [1].

Karbondioksit (CO_2) lazerinde CO_2 moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışımı CO_2 , azot (N_2) ve helyumdan oluşur. Uyarma azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli ya da darbeli olabilen yayının kızılaltı bölgede (10,6 μm veya 9,6 μm) yapılır. Karbondioksit lazerinin %10 ila %15 arasında değişen yüksek bir verimi vardır. Maksimum güç sürekli çalışmada 400 kW'tır [11].

HF/DF kimyasal lazerlerde lazer yayınının gerçekleşmesinde titreşim yönünden uyarılmış HF ya da DF moleküllerini üretmek için flor atomunun hidrojen (ya da izotopu döteryum) üzerindeki tepkimesinden yararlanılır. En güçlü lazerlerde flor atomu, F_2 molekülünün (ya da NF_3 bileşiğinin) özel bir odada hidrojenle (ya da bir hidrokarbonla) yanması ile elde edilir. Yayının dalga boyları HF lazeri için 2,7 μm , DF lazer için ise 3,8 μm 'dir [1].

Helyum-kadmiyum gibi en yaygın olan metal buharlı lazerlerde ise etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdur. 100 mW'a kadar olan güçlerde 441,6 ve 325 nm'lik dalga boyları ile sürekli çalışma sağlanabilir [1].

İyot lazerlerinde etkin olarak iyot kullanılmakta ve cam lazerin dalga boyuna yakın, 1315 nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayının gerçekleştirilmektedir [1].

2.3.5. Dinamik gaz lazerleri

Sıcak bir gaz hızla soğutulursa, alçak enerji düzeylerinin birindeki moleküllerin sayısı daha hızlı azalır yüksek bir düzeydeki moleküllerin sayısının altına düşebilir. Bu durumda lazer etkisi ortaya çıkar. Bu koşul yanmakta olan ve azotla karıştırılmış karbon monoksitin bir jet (fışkırma) memesinden çıkarken birden genişmesi

sırasında sağlanabilir. Böyle bir lazerden 30000 W'ın üstünde yüksek güçler elde edilebilmiştir [10].

2.3.6. Kimyasal lazerler

Bazı kimyasal tepkimelerde lazer etkisinin oluşmasına yeterli olacak sayıda yüksek enerjili atomlar ortaya çıkar. Örneğin, hidrojen ve flor elementleri hidrojen florür oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde ortamda bulunan CO_2 gazında lazer etkisi oluşur. Bu tür lazerlerde az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek olanaklıdır [10].

2.3.7. Yarı iletken lazerler

Yarı iletken lazerde farklı türden kanıtlanmış iki yarı iletken madde düz bir eklem oluşturacak biçimde yan yana getirilmiştir. Böyle bir aygıttan yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde lazer ışığı ortaya çıkar. Çıkış güçleri sınırlı olan yarı iletken lazerler, maliyetlerin düşüklüğü, boyutlarının küçük olması ve verimliliklerinin yüksekliği nedeniyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık ölçme aygıtlarında kullanılırlar [10].



Şekil 2.4. Yarı iletken lazer; a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Lazer oluşumu [11]

2.3.8. Serbest elektron lazerleri

Bunlar, bir hızlandırıcıdan çıkan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit, almasıık bir manyetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli yeğın bir ışıma kaynağı elde etmeye olanak verir. Elektronların enerjileri ya da manyetik alanın dönemi değıştirilerek, X ışınlarının dalga boylarından, uzak kızıl ötesinin dalga boylarına kadar değışen dalga boyları elde edilebilir [10].

2.4. Endüstriyel Lazer Türleri

Endüstride en yaygın olarak kullanılan lazer türleri karbondioksit (CO_2) ve Nd:YAG lazerleridir. Malzemeler farklı dalga boylarındaki ışıklara farklı tepkime verdiklerinden, her malzeme aynı dalga boyunda lazer ışığıyla kesilemez. Bu iki lazer çeşidi endüstride farklı malzeme türlerinin kesilmesinde farklı alanlarda oldukça yaygın bir biçimde kullanılırlar.

2.4.1. Karbondioksit (CO_2) lazeri

Bu lazer türü endüstride kesme, markalama ve kaynak işlemlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır.

Karbondioksit lazeri, endüstrideki en yüksek çıkış gücüne sahiptir. Elektronların gerilime maruz kalmasıyla yüksek olmayan basınçlı bir gaz dolaşımı tutuşur. Elektron darbeleri sonucu nüfus terslemesi olayı meydana gelir. Bu terslenme olayı için karbondioksit gazı dışında azot ve helyum gazları gereklidir [12].

Elektron darbeleri ile karbondioksitin uyarılması ya da azot ve karbondioksit molekülleri arasındaki darbelerle meydana gelir. Azot ile karbondioksit molekülleri arasındaki, darbelerle uyarma daha çok kullanılır. Azotun yüksek konsantrasyonu ve uzun ömürlü olmasından dolayı enerji bakımından, karbondioksit üst bir lazer

seviyesine ulaştırılabilir. Bu moleküllerin darbelenmesiyle enerji transferi meydana gelir [12].

Diğer bir gaz olan helyum gazı ise; darbe boşalması esnasında alt lazer seviyesini hızla boşaltıp, yüksek ısı iletkenliğiyle gaz karışımını soğutup, alt seviyenin de termik bir yüklemeye maruz kalmasını sağlar [12].

2.4.2. Nd:YAG lazeri

YAG; İtiryum-Alüminyum-Granat kelimelerinin baş harflerinden meydana gelmiştir. Bir katı hal lazeri olan Nd:YAG lazeri endüstride kaynak işlemlerinde, delme işlemlerinde, ve genellikle metallerin mikro işleme uygulamalarında başarılı şekilde uygulanmaktadır.

Neodimyum bu lazer çeşidinde lazer yayan elemandır. Neodimyum'un yüksek güçlü ark lambalarının ışığı ile uyarılması sonucu YAG kristali ışığa maruz kalır. Neodimyum bu ışığı absorbe ederek uyarılmış olur. YAG kristalinde iyon hızla üst lazer seviyesinin biraz daha üstüne çıkar. Bunun sonucu olarak serbest kalan enerji, ısı enerjisi şeklinde kristale geçer [12].

Tablo 2.1'de karbondioksit (CO_2) ve YAG lazer sistemleri bir takım özelliklerine göre karşılaştırılmaktadır. Birçok lazer çeşidi olmasına rağmen endüstride kullanılabilecek lazerler sınırlıdır. Bunlar dışında;

1. He-Ne lazeri
2. Eksimer lazeri
3. Argon lazeri
4. Karbonik oksit lazeri
5. Azot lazeri

Çok fazla uygulama alanı olmamasına rağmen bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. [5].

Tablo 2.1. Karbondioksit (CO₂) ve Nd:YAG lazerinin karşılaştırılması [13]

	CO ₂ Lazeri	Nd:YAG Lazeri
Dalga Boyu (μm)	10,6	1,06
Çalışma Şekli [CW(Sürekli), P(Darbeli)]	CW/P	P/CW
Maksimum Güç (kW)	25	2
Darbe Gücü (kW)	10 kW'a Kadar	100 kW'a Kadar
Işın Kalitesi	Maksimum	Düşük
Verimlilik (%)	5-10	2-5
Kullanım Yerleri	Termik Prosesler Makro İşleme	Termik Prosesler Mikro İşleme

2.4.3. Fiber lazerler

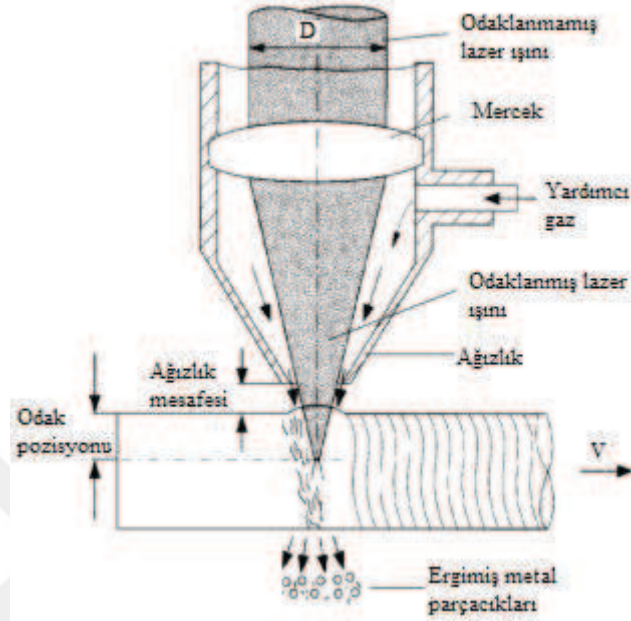
Fiber lazer kesim makineleri, diyot pompalı katı lazer aktif makineleri ile fiber optik kablusunun birleşimidir. Fiber optik kablo içerisinde, esnek lazer aktif kristal bir çubuk bulunur. İterbiyum emdirilmiş elyaf kablo, bir veya birden fazla diyot pompalı lazer ışını akımı altında yüksek güçlü lazer ışınların meydana gelmesine neden olmaktadır [14]. Fiber lazer makinaları endüstride malzeme kesimi ve malzeme üzerine markalama yapma işlemlerinde çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Fiber lazer makinalarında, ışının istenen konuma fiber optik kablolar yardımıyla rahatlıkla taşınabilmesi sayesinde robotik sistemlerde kullanımı oldukça yaygındır.

Fiber lazer makinalarının verimi diğer lazer türlerine göre oldukça yüksektir. Örneğin Nd:YAG lazer makinalarının verimi %2-10 arasında iken, fiber lazer makinalarında bu oran %30 civarındadır. Fiber lazer makinalarında enerji pompalama diyot lazer ile gerçekleşmektedir. Fiber lazer dalga boyu, Nd:YAG lazer ile neredeyse aynı olması sebebiyle aynı ekipmanlarla kullanılabilirler [14].

2.5. Lazer Işını İle Kesme ve Delme

Lazer gurubu hemen hemen paralel ⁴⁴modlu çan eğrisine uygun enerji dağılımı ile üretilir. Dış bükey optikler, lazer ışını kesme kafasına kadar taşıyıp, bu bölgede ışını odaklayarak malzeme yüzeyine iletirler. Gönderilen yüksek güç yoğunluğu malzemenin ısınmasını ve çok hızlı bir şekilde ergimesini sağlamaktadır. Sistem içinde (koaksiyel) kesme kafasından kesme yüzeyine verilen gaz, bir yandan lazer ile

kesme işleminde malzemeyi ortam gazlarından korumakta, bir yandan da kesilen yüzeyden malzeme taşınımı sağlamaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Lazer kesme kafasının şematik şekli [15]

Kesilen kısımdan malzemenin uzaklaştırılmasına göre üç farklı lazer kesme yöntemi mevcuttur ve bu kesme yöntemleri işlem görece malzemeye göre belirlenmelidir [16]:

1. Süblimleştirme ile kesme
2. Yakarak kesme
3. Ergiterek kesme.

Günümüzde özellikle otomotiv, gemi ve uçak endüstrilerinde lazer ile kesme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında geleneksel kesme yöntemlerine göre çok daha az malzeme kaybı, çok dar tolerans aralıklarında kesme kabiliyeti ve kesmeden kaynaklanan ısı etkilerinin parçalarda oluşturduğu distorsiyonun ihmal edilecek düzeyde olması, lazer ile kesme işleminin pek çok endüstri kolunda tercih edilerek yaygınlaşmasını sağlamaktadır [17,18].

Lazer kesimde lazer üreticinden çıkan ışın, bir mercek sistemi ile odaklanarak yaklaşık 0,2 mm çapına düşürülür. Böylesi küçük çapta bir odaklama ile yaklaşık $1,4 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ kadar yüksek bir enerji yoğunluğunun oluşumu sağlanarak, bütün malzemeler için geçerli olmak üzere buharlaşma fazına dönüşecek kadar sıcaklık elde edilir [19].

Endüstride, lazer kesme işlemleri için daha ucuz olduğundan, yaygın olarak CO_2 lazeri kullanılmaktadır. Ancak her malzemenin sadece CO_2 lazeri ile kesilmesi mümkün değildir.

Lazer aktif malzemesine göre elde edilen lazer dalga boylarının, malzemeler tarafından farklı değerlerde soğurulduğu bilinmektedir. Buna bağlı olarak lazer kesmede de malzemenin soğurma derecelerine bağlı olarak lazer türü belirlenmelidir, örneğin CO_2 lazeri ($\lambda = 10,6 \text{ } \mu\text{m}$) çeliklerin kesilmesinde kullanılırken, bakır ve alüminyum gibi malzemelerin soğurulma değerlerine göre Nd:YAG lazeri ($\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$) ile kesilmesi mümkündür [1].

Lazer türünün yanında kullanılan gazın da kesilen malzemeye göre seçiminin önemi büyüktür. Genellikle kompozitlerin ve demir dışı kesilmesinde soygazlar kullanılırken, çeliğin kesilmesinde oksijen kullanılmaktadır. Oksijen, kesme sırasında ısı veren (ekzotermik) bir tepkime oluşturduğundan, kesme bölgesindeki sıcaklığı arttırmakta ve aynı zamanda kesim bölgesinden malzeme taşınımını sağlamaktadır [1].

2.5.1. Lazer ışını ile kesme

2.5.1.1. Lazer ile süblimleştirerek kesme

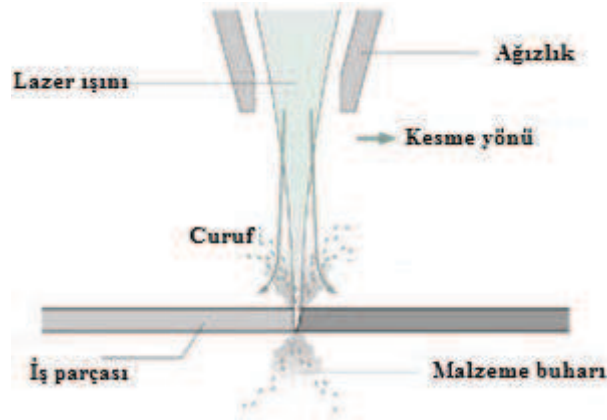
Süblimleştirerek kesmede malzeme lazer ışınının etkisi ile kesme kafası önünde doğrudan buharlaşmaktadır. Bu tür kesme fazı, katı eriyiğe geçme fazı tam belirgin olmayan veya ergiyik halde çok dar sınırlarda kalan tahta, kağıt, seramik ve plastik gibi malzemelerde gerçekleştirilebilmektedir [1].

Bu yöntemde darbeli lazer ile metallerin kesilmesinde çok yüksek bir lazer güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Lazer ışını ve malzeme arasındaki etkileşim bölgesinde oluşan ergiyik faz ısı kayıpları minimum düzeyde azaltılabilmektedir. Kalın parçaların bu yöntemle kesilmesi uygun değildir; çünkü buharlaşan malzeme, kesme sırasında oluşan kerf aralığını tekrar kapatmaktadır [1].

Bu yöntemde hemen hemen ergime olmamakta ve ilave gazın yardımı ile parlak bir kesim yüzeyi elde edilebilmektedir. Yüksek ve genellikle darbeli verilen enerji çok dar bir ısı etkisi altında kalan bölge (ITAB) oluşturmaktadır. Kesilen kenarlarda oksidasyon oluşmamakta ve böylece kesme aşamasından sonraki kullanımında, geleneksel yöntemlerle kesilmiş malzemelere göre bir üstün özellik sağlamaktadır. Genel anlamda süblimleştirme ile metallerin kesilmesinde kabul edilebilir kesme kenar ve yüzeyleri elde edilebilmektedir. Buna karşın bazı durumlarda kesme yüzeylerinde yanma lekesi gibi hatalar görülebilmektedir [1].

Bu üstün yönlerine karşın, süblimleştirme ile kesmeyi sınırlayan özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

1. Süblimleştirme ile kesme hızı, ergiterek kesme hızına göre çok yavaştır. Metalik malzemelerde bu yöntemle kesme çok dar kalınlıklarda yapılabilmekte ve yaklaşık 1 mm kalınlığından daha ince parçalar kesilebilmektedir.
2. Odaklama yerine göre, eğer kesme işlemi malzemenin içinde başlatılmışsa, oluşan plazma bulutu malzemeyi de etkileyerek kesme yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açabilmektedir. Böylesi tehlikeli bir metal buharının ortamdaki uzaklaştırılması için, işletmelerde bir filtre sisteminin kullanılması şarttır [1].



Şekil 2.6. Lazer-süblimleştirme kesme sistemi [20]

2.5.1.2. Lazer ile yakarak kesme

Bu yöntem metallerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında oksijen, ilave kesme gazı olarak lazer kesme kafasının yanından verilmektedir. Oksijen etkisi ile kesme bölgesinde oluşan ekzotermik (dışarıya ısı veren) tepkime, lazer ışınından daha yüksek bir ısı gücü oluşturmaktadır [1].

Ulaşılan kesme hızları, 6 ile 8 faktör arasında yer almakta olup, eriterek kesme yönteminden daha hızlı bir yöntemdir. Yöntemin esası, lazer ışınının sınırlandırılmış bir bölgeyi ön ısıtması ve bu bölgede malzemeye enerji taşınmasına dayanmaktadır.

Alaşımsız bir çeliğin yakarak kesilmesindeki aşamalar aşağıda verilmiştir;

1. Çeliğin ön ısıtılması,
2. Demir ve karbon kısımlarının yanması,
3. Akıcı cürufun kesme yüzeyinden uzaklaştırılması,
4. Işının ve malzemenin hareketi ile parçanın kesilmesi [1].

Sadece alaşımsız çelikler için geçerli olmak üzere lazer ile kesmedeki oluşumlar aşağıdaki gibi özetlenebilmektedir;

1. Malzeme oksijen ile kimyasal bir tepkimeye uğramalı ve oksidasyon oluşmalıdır.

2. Metalin yanma sıcaklığı ergime sıcaklığından yüksek olmalıdır.
3. Metaloksitin ergime sıcaklığı metalin yanma sıcaklığının altında bulunmalıdır.
4. Oluşan oksit düşük viskoziteye sahip olmalıdır.
5. Yanma ısısı mümkün olduğunca büyük olmalıdır.
6. Malzeme düşük bir ısı iletim katsayısına sahip olmalıdır [1].

Lazer ışını ile kesme işleminde, yakarak kesme geniş alanda kullanılmaktadır; özellikle görece kalın levhaların kesilmesi, ergiterek veya süblimleştirerek kesmeye göre daha yaygındır. Ayrıca bu yöntemde daha yüksek kesme hızlarına ulaşılabilmektedir. Buna karşın yöntemin üstün olmayan yönleri; oksijenin kesme kenarında bir oksit filmi oluşturması ve burgaç halindeki ergiyik banyonun kesme alanında ergiterek kesmeden daha güçlü bir kesme izi oluşturmasıdır [1].

2.5.1.3. Lazer ile ergiterek kesme

Ergiterek kesmede ana unsur malzemenin ergiyik fazda kalma süresidir. Bu ergiyik kısım kesme kafası aracılığı ile ortamdan uzaklaştırılmaktadır. İlave gaz malzemesi olarak genellikle inert azot (N_2) veya argon (Ar) kullanılmaktadır. CO_2 lazeri TEM_{00} modu ile birlikte enerji oluşumunu gerçekleştirmekte veya sürekli bir lazer oluşumunu gerekli kılmaktadır. Bu yöntem ile kesilen tipik malzemeler, amorf davranış sergileyen cam ve plastikler ve metallerdir [1].

Yüksek sıcaklıkta ergiyen malzemelerin bütün türlerinde bölgesel yüksek bir enerji yoğunluğu (TEM_{00}) kullanılmaktadır. Kısa sürede ergimesi gerçekleştirilen böylesi malzemelerde koruyucu gaz ile birlikte kesme işlemi yapılmaktadır ve kesme işlemi gerçekleştirilirken uygun yüksek bir gaz basıncı uygulanmaktadır [1].

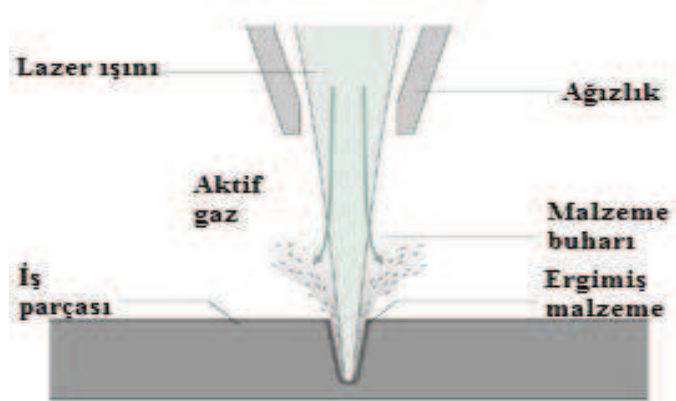
Standartlaştırılmış bir ergiterek kesme işleminde;

1. Malzemenin buharlaşmasına olanak tanınmayacak zamanda işlem yapılmalıdır.

2. Argon gibi soygazlar kesme kenarında oksidasyon oluşumunu engellemektedir.
3. Yakarak kesme ile karşılaştırıldığında kesme hızı daha düşüktür.
4. Yüksek alaşımlı çelikler dahil, bütün metallerin kesilmesi bu yöntemle mümkündür [1].

2.5.2. Lazer ışını ile delme

Lazer ışınının malzeme ile etkileşimi sonucunda malzemenin ergimesi, buharlaşması ve oluşan üst basınç (buhar ve çevre basıncı arasındaki değişim) etkisi ile işlem gerçekleşmektedir. Malzemenin lazer ışını ile delinmesinde, ergiyik fazın, buhar fazının veya her ikisinin de olduğu durumlar, malzeme özelliğine ve soğurulan güç yoğunluğuna bağlıdır. Silisyumnitrit gibi süblimleşme özelliği gösteren seramikler katı fazdan doğrudan buhar fazına geçerlerken, metaller, hem ergiyik hem de buhar fazının bir arada olduğu durumlarda lazer ile delme işlemine tabi olurlar. Yüksek güç yoğunluğuyla oluşan buhar ve plazma, lazer ışınının bir kısmını soğurarak, malzemenin ışını daha fazla soğurmasını engellemektedirler. Bu nedenle buhar ve plazma, kullanılan kesme gazları ile lazer – malzeme etkileşim bölgesinden uzaklaştırılmalıdırlar [1].



Şekil 2.7. Lazer ışını ile malzeme delme işlemi [20]

Lazer ışını ile yüksek hızlarda hemen hemen bütün malzemelere delme işlemi uygulanabilmektedir. Lazer ile delmede gerekli olan buhar basıncını oluşturabilmek için güç yoğunluğu değerinin $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ aralığında olması gerekmektedir.

Böylesi yüksek bir güç yoğunluğunu ancak birkaç yüz mikro saniyede darbeli bir Nd:YAG lazeri ile elde etmek mümkündür [1].

1. Tek Darbeli Delme: Her darbe süresi bir mikro saniyeden küçüktür. Zamansal güç yoğunluğu dağılımı ve odaklama ile farklı derinliklere sahip deliklerin oluşumu sağlanmaktadır. Elde edilen delik çapı, odaklanan ışının seçilen parametrelerine bağlıdır. Karakteristik olarak delik çapı 0,5 mm'den ve derinlik 2 mm'den küçüktür.
2. Seri Darbeli Delme: Aynı derinlikte lazer darbelerinin tekrarlı bir şekilde uygulanması yöntemidir. Bu yöntem ile daha derin ve çapı 1 mm'nin altında olacak şekilde daha dar delik elde etmek mümkün olup, derinlik / çap oranı, 10/1 değerinin üzerinde olmaktadır.
3. Basamak darbeli delme: Bu yöntemde delikler darbeli lazer ışını ile kesilir. Odaklama merceğinin döndürülmesi ile görece hareketlilik elde edilir. Bu yöntem ile deliklerin paralelliği tam, yüzey pürüzlülüğü oldukça düşük, deliğin derinliği birkaç mm'ye kadar ulaşabilmektedir [1].

Özellikle elektronik, sağlık, uzay ve biyomedikal sektörlerinde, parçaların mikro işlemi, büyük önem taşımaktadır. Teknikteki gelişimler mikro boyuttaki bileşenlerin kullanımını arttırma yönünde olduğundan, bunu gerçekleştirmek için mikro-işleme de gerek duyulmaktadır [1].

2.5.3. Lazer ışını ile kesmenin avantaj ve dezavantajları

Lazer ışını ile kesme yönteminin geleneksel kesim yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibidir.

Avantajlar;

1. Malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması: Yani gevreklik tokluk sertlik gibi özelliklerden bağımsızdır
2. Kısa işleme zamanı: Yüksek hızlarda kesim yapabilmektedir
3. Hassas işleme: Mikron derecesinde hatalarla kesme yapabilmektedir

4. Kesme takımı ve iş parçası arasında temas yoktur
5. İşlemler bütünüyle düşünüldüğünde maliyetlerin az olması
6. Esnek kablolar vasıtasıyla elde edilen ışının taşınabilmesi mümkündür
7. Kalıpsız imalat.

Dezavantajlar;

1. Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması
2. Isıl işlemde kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar
3. Sınırlı kalınlık/çap oranı ($H/D=10$)
4. Yüzey kalitesi.

Lazer ışını ile kesme endüstride genellikle, aşağıdaki metallerin kesilmesinde uygulanır. Bunlar;

1. Çelik (Takım çelikleri, yumuşak çelikler, yay çelikleri, silisyumlu çelikler)
2. Paslanmaz çelikler
3. Alüminyum ve alaşımları
4. Galvanizli saclar
5. Titanyum ve alaşımları [21].

2.6. Lazer İle Kesme İşlemlerinde Kesim Kalitesine Etki Eden Parametreler

Lazer kesme işleminin kalitesi genel olarak malzeme, lazer sistemi ve operasyon gibi değişkenler tarafından belirlenir [22]. Lazer sistem parametreleri, lazer ışınının dalga boyu, maksimum lazer güç çıkışı, lazer ışının kalitesi, kesilen malzemenin özellikleri ve kalınlığını içermektedir. Bu sistem parametrelerine ek olarak operasyon parametreleri de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak kullanılan lazer gücü, kesme hızı, odaklama merceğinin odak mesafesi, odak noktasının iş parçası üst yüzeyine bağlı konumu, yardımcı gazın basıncı ve türü, ağızlık çapı ve ağızlığın iş parçası üst

yüzeyine olan mesafesi verilebilir. Özel malzeme ve malzeme kalınlıklarında kesim yapmak için kullanılan özel lazer uygulamalarında kesme işlemini istenilen şekilde gerçekleştirmek için parametreler değiştirilebilir. Bu şekilde yüksek kesme hızlarında yüksek kesme kalitesi sağlanabilir. Lazer sistemlerinde kullanılan bazı karakteristik parametreler operatör tarafından değiştirilemezler [23].

2.6.1. Işın parametreleri

Işın parametreleri lazer ışınının özelliklerini karakterize eder ve lazer güç çıkışını, ışın kalitesini, ışın dalga boyu ve polarizasyonunu ihtiva eder. İş parçasının dikkate değer bir şekilde ısınmasından önce lazer ışını, ışının dalga boyunun, lazer ışınının polarizasyon durumunun, yüzeyin optik özelliklerinin ve ışığın geliş açısının belirlediği oranda yansıtılır ve emilir [24].

2.6.1.1. Lazer çıkış gücü ve yoğunluğu

Lazer gücü, her saniye lazer ışığı formunda yayımlanan toplam enerjidir. Lazer ışın yoğunluğu ise gücün, lazerin yoğunlaştırıldığı alana bölünmesiyle elde edilen bir parametredir. Lazer ışınının küçük bir noktaya odaklanmasıyla elde edilen yüksek ışık yoğunluğu kesme uygulamaları için istenilen bir özelliktir. Çünkü bu özellik kerf aralığının çok kısa zamanda hızlı bir şekilde ısınmasını sağlar ve böylece yüksek kesme hızları ve mükemmel kesme kalitesi elde edilmiş olur. Ek olarak çoğu metalin yansıtma özelliği, düşük ışık yoğunluğunda yüksektir ve yüksek ışık yoğunluğunda düşüktür. Malzeme kalınlığı arttıkça yoğunluğunda artması gerekir. İşlem geliştirme sırasında optimum güç değerleri belirlenir. Çünkü aşırı güç geniş bir kerf aralığı ve artık malzemenin artışı ile sonuçlanırken, yetersiz güç ile kesme işlemi başlatılamaz [25, 26].

2.6.1.2. Işın kalitesi

Lazer ışın kalitesi, ışının kesit düzlemindeki enerji dağılımını temsil eden bir lazer ışın modu ile karakterize edilir. Tekdüze bir enerji dağılımına sahip iyi bir ışın modu,

lazer kesme için son derece önemlidir. Çünkü hassasiyeti ve kesme hızını arttıran yüksek güç yoğunluğunu ancak böyle bir ışığın küçük bir noktaya odaklanması ile mümkün olur. Yüksek düzensizliğe sahip modlar malzemenin kerf dışında ısınmasından dolayı zayıf kesme kalitesi ile sonuçlanmaktadır [25].

2.6.1.3. Dalga boyu

Metal malzemelerin ışığı yansıtılma özelliği lazerlerin dalga boyunun bir fonksiyonudur. Metaller uzun kızılötesi dalga boylarını (CO_2 lazer dalga boyu), kısa kızılötesi dalga boylarından (Nd:YAG lazer dalga boyu) daha iyi yansıtır. [25, 27]. Bir Nd:YAG ışını daha iyi hassasiyet, daha dar bir kerf genişliği ve daha kaliteli bir kesme yüzeyi sağlamak amacıyla CO_2 lazer ışınından daha küçük çaplara odaklanabilir [26].

Bir CO_2 lazerin kızıl ötesi dalga boyunun ($10,6 \mu\text{m}$) emme oranı malzemelerin elektrik iletkenlikleri tarafından belirlenir. Oda sıcaklığında altın, gümüş, bakır, alüminyum gibi iletkenliği yüksek metaller çok az miktarda CO_2 lazer ışını soğururlar ve bunun büyük çoğunluğunu yansıtırlar. Çelik gibi orta düzey iletken malzemeler %10 civarında bir soğurma gösterirler. Plastik ve ahşap esaslı yalıtkan malzemeler mükemmel soğurma kabiliyeti gösterirler. Diğer yandan Nd:YAG lazerlerin kısa kızılötesi dalga boylarının ($1,06 \mu\text{m}$) soğurma kabiliyeti kafes atomları tarafından belirlenir. Metaller için bu mekanizma CO_2 lazer dalga boylarından daha iyi bir soğurmaya yol açar. Ama yalıtkanlar yalnızca ihmal edilebilir bir soğurma gösterir, neredeyse Nd:YAG lazerlerde mükemmel bir geçirgenlik söz konusudur. Çünkü yalıtkanların ışını soğurabilmesi amacıyla iyonize olması için çok büyük enerji gerekmektedir. Bir uygulama için bir lazerin uygunluğu diğerlerinden ziyade güç, darbe uzunluğu, odaklanabilirliği ve dalga boyu özelliğine dayandırılır [25, 27].

2.6.2. Malzeme parametreleri

Lazer çok farklı termal ve fiziksel özelliğe sahip malzemelerin kesilmesinde kullanılır. Metal malzemelere örnek olarak yumuşak çelikler, titanyum ve paslanmaz çelikler, metal olmayan malzemelere örnek olarak seramikler, cam, ahşap, kağıt ve plastik verilebilir. Metal malzemelerinin ergime sıcaklıkları yüksek olduğundan kesme işlemi için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Metal dışı malzemelerin kesimi düşük güç yoğunluklarında gerçekleşebilir. Metal yüzeyine karşı odaklanmış lazer ışını metal yüzeyi tarafından kısmen soğurulur, kısmen yansıtılır. Malzemenin lazer gücünü soğurma kabiliyeti metal yüzeyinin yansıtma özelliği tarafından belirlenir, malzemenin optik özelliğinin sıcaklığa bağlı olması sebebiyle değişiklik gösterir. Bunların yanında azda olsa yüzey görünümü, metalürjik faz ve yüzeye yakın yerlerdeki gazların ve parçacıkların lazer ışını ile etkileşimine bağlı olarak değişir. Malzemenin termal ve fiziksel özellikleri, işlem parametrelerinin yanı sıra doğru lazer-malzeme kombinasyonunu oluşturmak için önemlidir [24, 25].

2.6.2.1. Termal özellikler

Lazer kesimin etkinliği lazer enerjisinin malzemeye nüfuz etme miktarına bağlıdır. Bu yüzden malzemenin termal özellikleri lazerin kesme kabiliyeti ve kesme işleminin kalitesinde büyük rol oynamaktadır [28].

Bazı metallerin kızıl ötesi lazer ışınını yansıtma kabiliyetinin yüksek olması kesme işleminin esaslarına zorluk teşkil edebilir ve kesmenin başlamasını zorlaştırabilir. Yüksek termal iletkenliğe sahip bir metalin kesilme işlemi esnasında, ısı kesim bölgesinden malzemeye doğru hızla yayılmaya başlar. Bu yüzden esas kesme bölgesinde yüksek güç seviyeleri ya da düşük kesme hızları gerekmektedir. Fakat azalan kesme hızı anormal erime bölgeleri ve zayıf kenar kalitesi ile sonuçlanan düzensizliklere sebep olur. Isıl kapasitesi yüksek, ergime ve buharlaşma sıcaklıkları belli olmayan malzemeleri kesmek için yüksek miktarda enerji gerekmektedir [21].

2.6.2.2. Fiziksel özellikler

Boyalı ve yağlı yüzey şartları kesme işleminde beklenmedik performanslara sebep olabilir. Yüzeydeki yükseklik değişimleri, haddeme kusurları, oluklar kenar kalitesi için zararlıdır. İnce ve üniform bir oksit tabakası ise lazer ışının soğurulmasına katkıda bulunur ve kesme performansını geliştirir.

Yüksek yüzeysel gerilmeye ve düşük viskoziteye sahip ergimiş malzemelerin yardımcı gazlar ile kesme yüzeyinde uzaklaştırılmaları zordur ve bunlar kesme kenarının altına yapışırlar. Kesilen plakanın kalınlığı işlemin gerçekleştirilebilmesi için gereken lazer gücünü belirler [26].

2.6.3. İşlem parametreleri

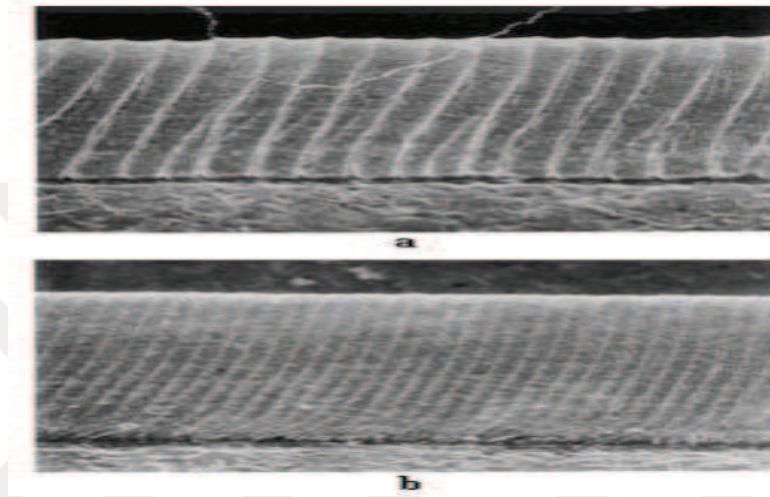
İşlem parametreleri kesme işleminin kalitesinin geliştirilmesi ve başarılı bir kesim sonucu elde etmek için değiştirilebilen karakteristikleri ihtiva eder. Ama bazı işlem parametreleri operatör tarafından değiştirilemez [29].

2.6.3.1. Sürekli dalga (CW) ve darbeli lazer gücü (P)

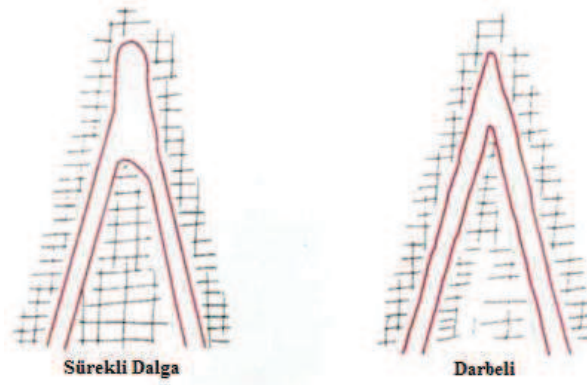
Yüksek gerilim darbeli veya sürekli ışınla sağlanabilir. Darbeli kesimde en yüksek darbe gücü ve sürekli kesimde ortalama güç, ışının nüfuziyet derinliğini belirler. Yüksek bir sürekli dalga lazer ışını özellikle daha kalın kesitli malzemelerde, yüksek kesme oranlarına sahip uygulamalarda düz bir kesim için kullanılır. Çünkü en yüksek kesme hızları yüksek ortalama güç seviyelerinde elde edilir. Fakat kesme kalitesinin bozulması ve iş parçasının ısınmasına sebep olan, kerf çeperinden iş parçasının diğer kısımlarına transfer edilen ısıyı önlemede yetersizdir. Daha düşük enerjili darbeli ışın ince parçaların hassas kesimi için, yüksek güçlü sürekli dalga lazerine tercih edilir. Çünkü düşük ortalama güce sahip lazer ile işleme, kerf boşluğunda cüruf oluşumunu düşürür ve kerf boşluğundan sıcak malzemenin atılmasını sağlayan bir kesim gerçekleştirirken, kısa darbeli yüksek zirve gücüne sahip lazerler etkili bir ısınmayı garanti eder. Ayrıca yüksek zirve gücüne sahip darbeli bir lazer, yüksek ısı

iletkenliğe sahip malzeme işlemlerinde ve aşırı ısınma probleminin meydana geldiği karmaşık ve dar geometrilerin kesiminde avantajlıdır [25, 26].

Darbeli kesimlerde oluşan şeritler, sürekli dalgalı lazer ile kesimlerde oluşanlara göre daha iyidir (Şekil 2.8). Ek olarak keskin köşelerin kesimi, darbeli kesimde sürekli dalga lazerine göre daha başarılı bir şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 2.9) [19, 25].



Şekil 2.8. (a) Sürekli dalga lazeri ve (b) Darbeli lazer kesimi karşılaştırması [38]



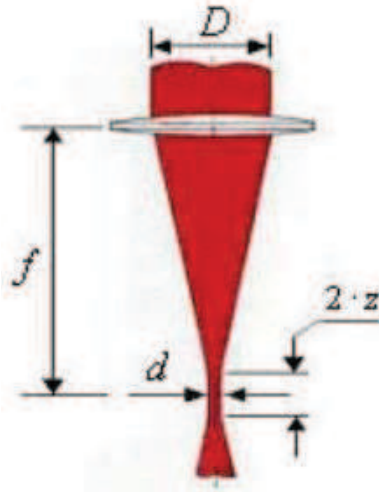
Şekil 2.9. Keskin bir köşede darbeli kesim etkisi [25]

2.6.3.2. Merceğin odaklama mesafesi

Katı hal lazerinde ışını dağıtmak için genellikle fiber optiklerden yararlanılır. Işık kablounda paralel bir ışın demetine yayımlanan lazer ışınıni biçimlendirmek için ise

kolimatörler kullanılır. Lazer ışını ışın kablosundan ve kolimatörden geçtikten sonra, bir odaklama merceği paralel ışın demetini iş parçası yüzeyine odaklar. CO₂ lazerler ışık dağıtımı için fiber optikleri kullanmazlar. Bu yüzden lazer tarafından yayımlanan ışın doğrudan mercek ile malzeme yüzeyine odaklanır. Lazer kesme işleminin gerçekleşmesi, yüksek güçlü lazer ışığının malzemeyi kesmek için oluşturulması gereken güç yoğunluğunun sağlanabileceği küçük bir noktaya odaklanmasını gerektirir. Merceğin odaklama mesafesi odak noktasının boyutunu ve ayrıca tatmin edici bir kesmenin sağlandığı odak derinliğini belirler [25, 26].

63 mm odak mesafesine sahip mercekler, kalınlığı 4 mm'den az olan malzemelerin kesimi için, küçük odak boyutu, paralel ve dar bir kerf aralığı sağladıkları için tercih edilmektedirler. Daha uzun odak mesafesi daha kalın malzemelerin kesilmesinde kullanılır [26]. Uzun odak mesafesine sahip mercekler, çalışma alanını genişletir, merceğin kirlenmesini minimuma indirir ve odak derinliğini arttırlar. Yüksek kalitede bir lazer ışını, odak noktası boyutundan taviz vermeden, ancak daha uzun mesafeli bir mercek kullanılarak mümkün olur. Kesme uygulamalarında mercek seçimi için kritik faktörler, odak nokta boyutu ve odak derinliğidir. Bu yüzden odak mesafesi, kesilecek malzemenin kalınlığına göre optimize edilmelidir [25, 30]. Şekil 2.10'da lazer ışığının odaklanması gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Lazer ışığının odaklanması [25]

2.6.3.3. Malzeme yüzeyine bağlı odak pozisyonu

Odak pozisyonu optimum kesme kalitesini sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Malzeme kalınlıklarındaki farklılıklar, odak değişiklikleri ve lazer ışınının biçiminde çeşitlenmeler gerektirebilir [25].

Oksijenli kesimde maksimum kesme hızları, ışının odak yüzeyi ince levhalar için düzlem yüzeyi ve kalın levhalar için tabandan levha kalınlığının üçte biri kadar yüksekte ayarlandığında başarılabilmektedir. Ama atıl bir gazın kullanıldığı kesimlerde optimum pozisyonlar alt yüzeye yakın yerlerdir. Çünkü gaz akışının kerf aralığına ve ergimiş metalde daha geniş bir alana nüfuz etmesi, daha geniş bir kerf meydana getirir. Atıl gaz kullanılarak yapılan kesimlerde daha geniş bir ağızlık çapı kullanılır. Eğer odak düzlemi malzemeye çok yüksek veya çok alçak pozisyonlandırılırsa, kerf genişliği ve cüruf tabakası büyür ve kesme için gerekli güç yoğunluğu sağlanamaz hale gelir [26].

2.6.3.4. Kesme hızı

Lazer kesme işlemlerindeki enerji dengesi iki parçaya ayrılmaktadır. Bir kesme meydana getirmek için enerji kullanılır ve kullanılan enerji kesme bölgesinden uzaklaşır. Bu da göstermektedir ki, kesmede kullanılan enerji, kesmeyi gerçekleştirmek için gereken zamandan bağımsızdır. Fakat kesme bölgesinden olan enerji kaybı harcanan zamanla orantılıdır. Kesme bölgesinden olan enerji kaybı kesme hızının artmasıyla azalır. Kalın malzeme kesiminde kesme hızındaki azalma, kayıp enerjide artmaya ve işlemin etkinliğinin düşmesine yol açar. Çoğu metalde meydana gelen termal iletkenliğe bağlı ısı kayıpları, malzeme kalınlıklarındaki artma ve kesme hızlarındaki azalma ile hızlıca artar [30].

Kesme hızı, lazer gücü ve gaz akış oranı ile dengelenmelidir. Kesme hızının artmasıyla kesme kenarında oluşan şeritler daha da belirginleşir, kesme kenarı altında cüruf biriktirme artar ve nüfuziyet azalır. Yumuşak çelik keserken oksijen kullanıldığında, düşük kesme hızlarında, kesme kenarlarında aşırı yanmalar meydana

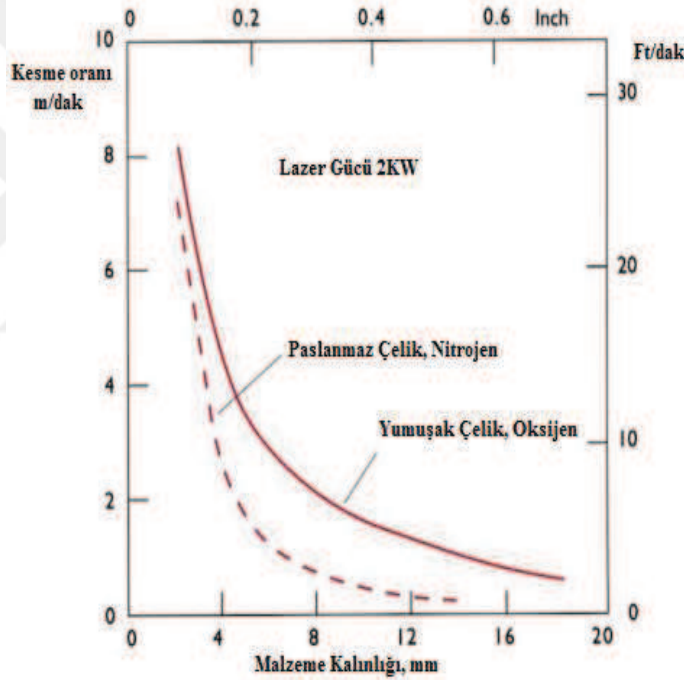
gelir. Bu da kenar kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) genişletir. Genellikle malzemeler için kesme hızları malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Hız, keskin köşe kesimlerdeki yanmalardan kaçınmak için azaltılmalıdır [26].

2.6.3.5. İşlem gazı ve gaz basıncı

İşlem gazının lazer kesimde beş temel ilkesi vardır. Nitrojen gibi bir atıl gaz cürufu kesme bölgesinin altında yeniden katılaşmadan uzaklaştırır. Oksijen gibi bir aktif gaz malzeme ile ekzotermik bir reaksiyonda yer alır. Gaz ayrıca yüksek ısı gücü ile, kalın malzemelerin kesiminde plazmanın oluşumunu destekleyen bir rol oynar ve odaklama merceği gaz akışı tarafından kirlenmekten korunur. Kesme kenarı gaz akışı tarafından soğutulur ve böylece ısı tesiri altındaki bölgenin genişlemesi kısıtlanır [26].

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yaygın olarak kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajları ile birlikte oksijen(aktif gaz) ve nitrojendir(inert gaz). Tamamen atıl olmamasına rağmen, nitrojen ucuz olması sebebiyle yaygın bir şekilde atıl gaz olarak kullanılır. Saf atıl gaz olan argon ve helyum gazları titanyum kesiminde kullanılır. Çünkü bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılgan titanyum nitürlerinin oluşumunu önler [26, 28, 31]. Nitrojen gazı, kerf aralıklarından uzaklaştırmak için daha yüksek basınç gerektirdikleri için paslanmaz çelik, alaşımlı çelik, alüminyum ve nikel alaşımlarının kesiminde kullanılırlar. Yüksek gaz basıncı ergimiş malzemeyi kerf aralığından uzaklaştırmak için ekstra mekanik bir kuvvet sağlar. Yüksek basınçlı nitrojenli kesim paslanmaz çelik kesmede kullanılır. Bunun nedeni parlak ve oksitsiz bir kesme kenarı ortaya koymasıdır. Fakat oksijen kullanılarak yapılan kesimden daha düşük kesme hızları ile işleme gerçekleştirilir. Atıl gaz ile yapılan kesimlerde asıl problem, yeniden katılaşan ergimiş metalin kerf aralığında çapaklar oluşturmasıdır. Çapaksız ve pürüzsüz kesim bazı işleme parametrelerinin optimize edilmesiyle başarılı; ağızlık çapı, odak pozisyonu ve gaz basıncı. Nitrojen 10-20 bar civarında bir basınç ortaya koyar ve basınç gereksinimi malzeme kalınlıklarının artmasıyla artar. Nitrojen gazının saflığı %99,8 civarlarında olmalıdır [25, 26, 28, 31, 32].

Oksijen genellikle düşük alaşımlı çelik yumuşak çeliklerin kesilmesinde kullanılır. Oksijen kullanımı, kesit kalınlıklarının 12 mm'nin üzerinde olduğu ve yüksek kesme hızları için yüksek kesme gücü gerektiren işlemlerde ekzotermik bir reaksiyona sebep olur. Fakat oksijenli kesim, kesim kenarlarında oksitlenmeye sebep olur. Kenar pürüzlülüğü ve cüruf yapışmasını minimuma indirmek için işlem parametrelerinin çok dikkatli kontrol edilmesi gerekmektedir. Oksijen gazı ağızlık basıncı genellikle 0.5-5 bar arası bir basınçta tutulur. Oksijen basıncı levha kalınlıkları arttığında yanma olayından kaçınmak için azaltılır ve ağızlık çapı artırılır. Şekil 2.11'de 2 KW güce sahip CO₂ lazer için kesme hızı grafiği verilmiştir.



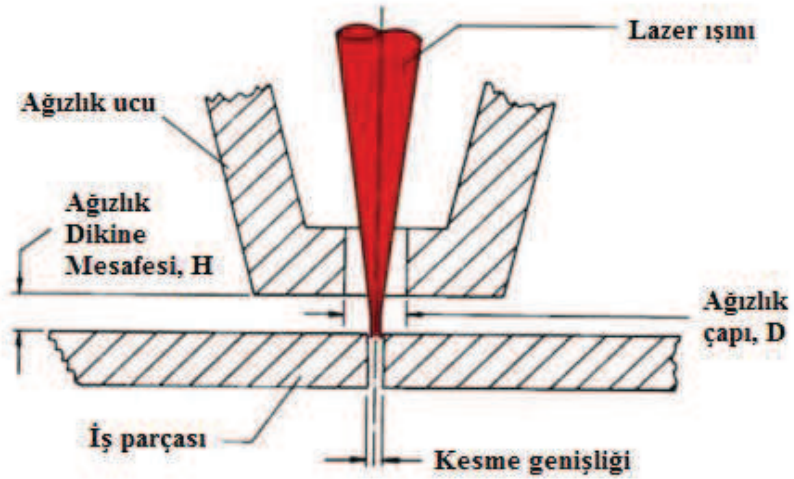
Şekil 2.11. 2 KW CO₂ lazer için kesme hızı grafiği. Yumuşak çeliğin kesiminde yardımcı gaz olarak oksijen kullanılmıştır. Paslanmaz çeliğin kesiminde yüksek basınçlı (20 bar) nitrojen kullanılmıştır [25]

2.6.3.6. Ağızlık çapı ve dikine mesafesi

Ağızlık, kesme gazının kesme bölgesine lazer ışını ile birlikte eş eksenli bir biçimde taşınmasını sağlar ve ergime havuzundaki türbülansı minimuma indirmek için gaz basıncını ayarlar. Ağızlık tasarımı, özellikle de ağız kısmı tasarımı kesme gazı jetinin biçimini ve böylece kesme kalitesini belirler. 0,8 mm ve 3 mm arasında değişen ağız

çapı, malzeme ve levha kalınlığına göre seçilir [26]. Odaklanmış lazer ışınının boyutu çok küçük olduğundan, kesme işlemi boyunca kesme kerf aralığı, genellikle ağızlık çapından daha küçük olur. Sonuç olarak gazın yalnızca bir kısmı kerf boşluğuna nüfuz eder ve bu yüzden yüksek bir gaz basıncına ihtiyaç duyulur [25]. Eksen dışı ağızlıklar ek olarak ayna odaklama uygulamalarında kullanılmaktadır. Fakat kesme basıncı 200 KPa basınç ile sınırlıdır [33].

Dik mesafe ağızlık ve iş parçası arasındaki mesafedir. Bu mesafe, kesme kalitesini ve kesme performansını doğrudan etkileyen, gazın akış modeline etki eder. Basıncıdaki fazla değişiklik, dik mesafenin fazla olduğu durumlarda meydana gelir. Dik mesafenin ağızlık çapından daha küçük olması önerilir. Çünkü geniş mesafeler, iş parçası ve ağızlık arasındaki boşlukta büyük basınç değişimlerine ve türbülansa sebep olur. Kısa dik mesafeye sahip sistemde kerf, bir ağızlık gibi davranır ve ağızlık geometrisinin hassasiyeti önemini kaybeder [25, 26]. Şekil 2.12’de ağızlık geometrisi ve tanımlamaları gösterilmiştir.



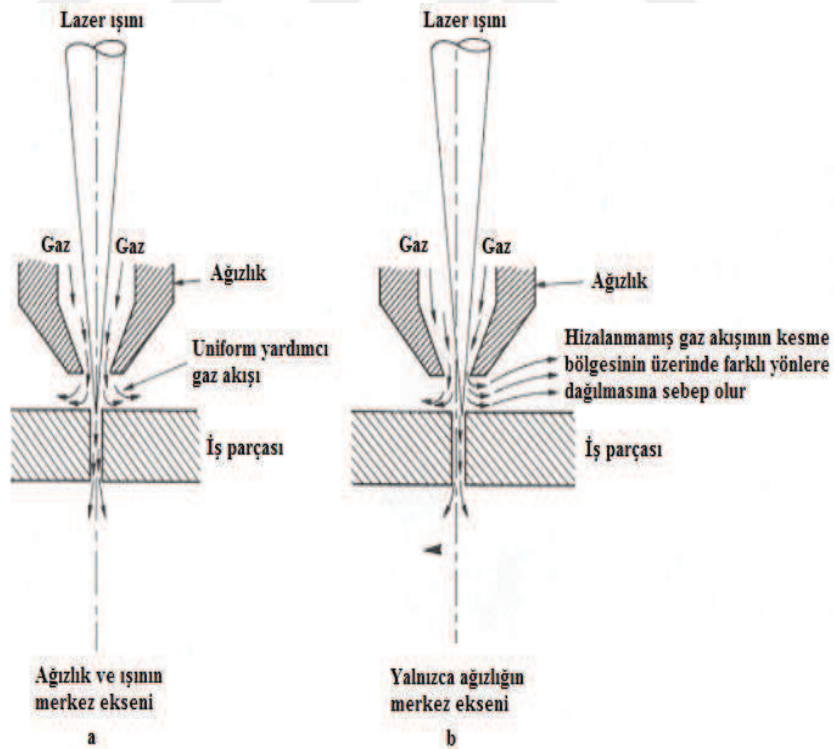
Şekil 2.12. Ağızlık geometrisi ve tanımlamaları [25]

2.6.3.7. Ağızlık hizası

Lazer ışını ile kesme gazı jetinin hizasındaki uyumsuzluk düşük kesme kalitesine sebep olur. Ağızlıktan çıkan ve ağızlık ile eş eksenli gaz akışı, malzeme yüzeyinde

bir basınç meydana getirir. Eğer ağızlık ve odaklanmış lazer ışını eş eksenli ise lazer ışını gaz jetinin tam merkezinden geçer ve yardımcı gaz akışı düzenli olur [26, 19].

Yapılan önceki çalışmalar, kayık eksenli sistemin eş eksenli sisteme göre bazı avantajlarının olduğunu göstermiştir. Eş eksenli gaz-ağızlık sistemlerinde, ağızlık çapı kerf aralığından daha büyüktür. Bu yüzden kerf boşluğundaki basınç kayıpları, ağızlıktakinden daha fazladır. Çünkü tercih edilen ağızlık dikine mesafesi 0,3 mm ve üzeridir. Gazın çoğu iş parçasıyla ağızlık arasından dışarı çıkar. Gazın radyal hızı simetri ekseninde sıfırdır ve gaz dağıldıkça artar. Radyal akış kerf aralığının tabanına doğru gaz akışını etkiler. Böylece kerf tabanına doğru akış, eğer lazer ışını merkez eksenin önünde ise en büyük, arkasında ise en küçük değerini alır. Bu da eş eksenli sistemle karşılaştırıldığında, kayık eksenli sistemde kaliteli bir kesimin meydana geldiği kesme aralığının daha geniş olduğunu gösterir [34]. Şekil 2.13'te her iki ağızlık hizası durumu gösterilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Lazer ışını ve gaz jetinin dengeli konumlandırılması durumu (b) Ağızlık ve lazer ışını kayık eksenli olma durumu [19]

BÖLÜM 3. OPTİK ESASLAR

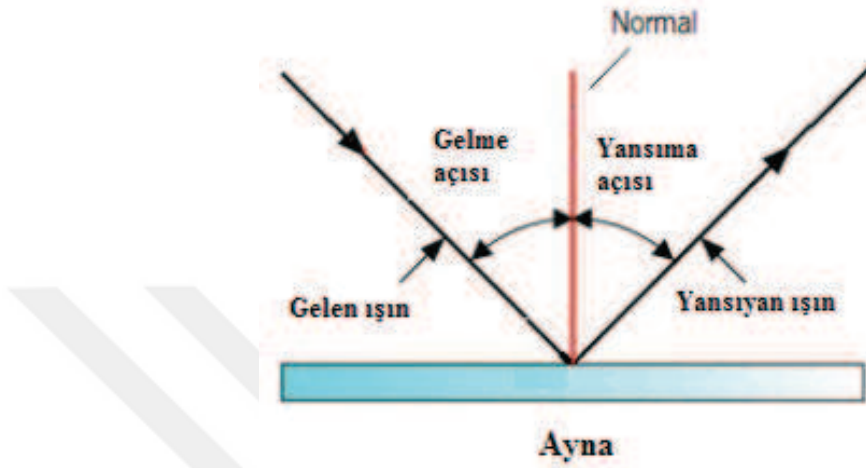
Optik konusu lazer kesim makinalarında en önemli unsurdur. Optik işlemler ne kadar hassas ve doğru seçilmiş parçalarla yapılırsa kesme kalitesi de o kadar artmaktadır. Bu bölümde lazer kesim makinalarında ışığın taşınması, odaklanması, döndürülmesi gibi optik işlemler ve bu işlemlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan parçalar açıklanacaktır. Ayrıca ışının su içerisindeki davranışları incelenecektir.

3.1. Lazer Kesim Makinelerinde Optik Esaslar

3.1.1. Yansımaya

Düzlemsel bir aynada ışığın ve lazer ışınının yansıması (refleksiyon) ile yüzeye gelen ve yüzeyden yansıyan ışık tarif edilir. Gelme açısı α_g ve yansımaya açısı α_y eşit büyüklüklere sahip değerlerdir. Lazer ışınının farklı gelme açılarının oluşturulması için, döndürülebilir aynalar kullanılmaktadır. Ayna ϕ açısı ile döndürüldüğünde, lazer ışını bu değerin iki katı bir değer ile daha farklı bir yönde 2ϕ devrilir (Şekil 3.1). Aynanın küçük açı değişimleri ile göreceli olarak lazer ışınının yönü büyük oranda değişmektedir. Böylesi bir durumda lazer ışınının şekli ve paralellüğünde herhangi bir değişme oluşmamaktadır. Kullanılan aynaların yüzeyleri tamamen eş dağılımlı (homojen) ve yüksek yansıtma özelliklerine sahiptir; yüksek değerlikli aynaların yaklaşık %99,5 değerine kadar yansıtma özellikleri vardır. Böylesine yüksek dereceli aynaların kullanımı, silisyum kaplama bakır ve volfram aynalar ile sağlanabilir. Yüksek enerji dağılımlı (güç yoğunluklu) lazer ışınlarında tercih edilen metal aynalar su soğutmalı olarak kullanılmaktadırlar; çünkü yüksek enerjili lazer ışını metal yüzeyini ısı olarak etkilemektedir. Silisyumun ısı dayanımı göreceli düşük güç yoğunluğu değerlerinde olup 10^3 W/cm^2 'dir. Lazer ışınının odaklanması için küresel veya parabolik aynalar kullanılmaktadır. Paralel olarak optik eksene

gelen ışınlar aynanın odak noktasında toplanırlar. Bu odak noktasında lazer ışınının güç yoğunluğu öncesine göre daha da yükselmektedir. Küresel aynalarda ışınlar, odak noktasında şüphesiz yakınsak olarak toplanmaktadırlar. Iraksak odak noktası için ise parabolik aynalar kullanılmalıdır [1].



Şekil 3.1. Düzlemsel aynada ışığın yansıması [35]

3.1.2. Işığın kırılması

Işık, n_1 kırılma indisine sahip bir ortamdan, n_2 kırılma indisine sahip başka bir optik ortama geçerken kendi yönünden sapar. Böylesi bir durum lazer ışını içinde geçerlidir. Buna ait olan kırılma kanunu aşağıdaki eşitlikte (Denklem 3.1) verilmiştir:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\cos \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

Işık, zayıf ortamdan yoğun optik ortama gönderildiğinde dikmeye (normale) yaklaşarak kırılır. Buna karşın ışığın yoğun optik ortamdan zayıf optik ortama gönderilmesi ile dikmeden uzaklaşarak kırılması söz konusudur.

Lazer ışığının güç yoğunluğunun bir kısmı kırılma olayı ile kaybolur; çünkü kırılma indisine bağlı olarak ışığın bir kısmı sınır yüzeyde yansıtılmaktadır [1].

3.1.3. Aynalar ile ışığın yönlendirilmesi

Aynalar ve toplam yansıtıcılar lazer sistemlerinde ışın yönlendirme işlemi için kullanılmaktadır. Aynanın yansıtma kabiliyeti aynanın yüzey kalitesi, kaplama malzemesi, geometrisi gibi parametrelere bağlıdır. Aynaların yansıtma kabiliyetini gelen ışınla yansıyan ışığın arasındaki güç farklarının yüzdesi alınarak hesaplanır.

Kullanılan ayna çeşitleri şöyledir:

1. Metal kaplamalı aynalar
2. Yalıtkan aynalar
3. Eğimli aynalar
4. Dikorik aynalar [36]

3.1.4. Prizmalar ile ışığın döndürülmesi

Lazer ışınının kendi yönünden 90° döndürülebilmesi için eşkenar ve dik açılı prizma kullanılmaktadır. Yansıma kuralına göre ışın prizmada tam yansıma kuralına göre kırılmaktadır. Yansımada kaybı engellemek için, prizmanın dik kenarları ayna parlaklığında hazırlanır. Işının 180° döndürülmesi de benzer biçimde eşkenar ve dik açılı prizma ile gerçekleştirilir. Gelen ışın prizmanın dik kenarları tarafından tam yansıma ile yansıtılır. Öngörülen ışın kırılmasını sağlamak için her iki prizmada da doğru bir ayarlama gerekmektedir.

Pentagonal prizma kullanılmasında ise gelen ışın her zaman 90° açıyla kırıldığı için, herhangi bir ayarlama yapmaya ihtiyaç duyulmamaktadır.

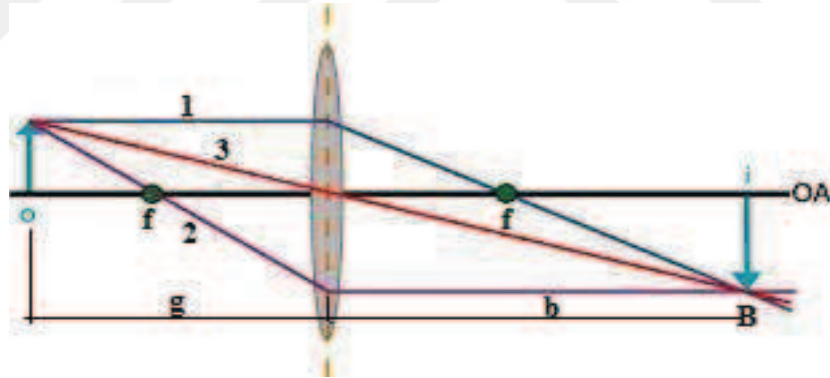
Cam bir plakada, n_1 kırılma indisine sahip ortamdan gelen ışın paralel cam plakanın yüzeyinden itibaren n_2 ortamına girerek kırılmakta ve tekrar n_1 ortamına çıktığında, geldiği yöne paralel olarak yoluna devam etmektedir [1].

3.1.5. Cam fiber optik

Esnek bir özelliğe sahip cam lifli kabloların (cam fiber optik kablolar) kullanılmaya başlanması ile ışın taşınımına yönelik yeni konstrüksiyon imkanları doğmuştur. Zamanla cam fiber optik kablolar 1,2 kW gücüne kadar sahip olan katı hal lazerlerde kullanılmaya başlanmıştır. Daha uzun dalga boyuna sahip olan CO₂ lazerinin taşınımı ancak ayna sistemleri ile gerçekleştirildiği için, 10,6 µm dalga boyuna sahip bu lazerde cam fiber optik kabloları kullanılamamaktadır [1].

3.1.6. Mercekler

Mercekler cam yapısında olup, iki küresel yüzeyden meydana gelmektedirler. Merceklerden geçen ışınlar iki kez kırılarak geçerler. Işın çıkışındaki oluşum, mercek ana düzleminde kırılan her iki ışının bir kırılmada elde edilen toplamından meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Konveks mercek ile ışın taşınımı, 1: paralel ışın, 2: odak noktası ışını, 3: orta nokta ışını, f:odak noktası, g:sanal uzaklık, b:cismin uzaklığı, B:cismin büyüklüğü

Odak uzaklığı "f", görüntü uzaklığı "b" ve sanal uzaklık "g" gibi bütün değerler bu ana düzlemde yer almaktadır (Şekil 3.2). Optik eksene paralel gelen ışınlar konveks bir mercekten geçip merceğin odak noktasında (f) birleşirler. Mercek düzlemi ile odak noktası arasındaki uzaklık odak uzaklığı olarak tanımlanmaktadır. Konveks merceklerin geometrisine göre aşağıdaki eşitlikler geçerlidir:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (3.3)$$

Lazer ışını ışın kaynağından ışık merceğine geldiği için sanal görüntü sonsuz uzaklıkta yer alır. Bu duruma göre yukarıda verilen görüntü eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} \text{ olmaktadır; çünkü } \frac{1}{g} = \frac{1}{\infty} \text{ değerindedir.}$$

Buna göre; $b=f$ dir.

İki merceğin kombinasyonu ile lazer ışını yakınlaştırılabilir veya uzaklaştırılabilir. Merceklerin odak noktaları tek bir noktada birleştiğinden, merceklerin arasında sadece ışın odak noktası yer almaktadır. Bu yüzden, eğer $f_1 \neq f_2$ ise ya büyük ışın çapı d_1 ya da küçük ışın çapı d_2 oluşur.

Buna göre d_1 ve d_2 ışın çapları için aşağıdaki ilişki (Denklem 3.4) yazılabilir:

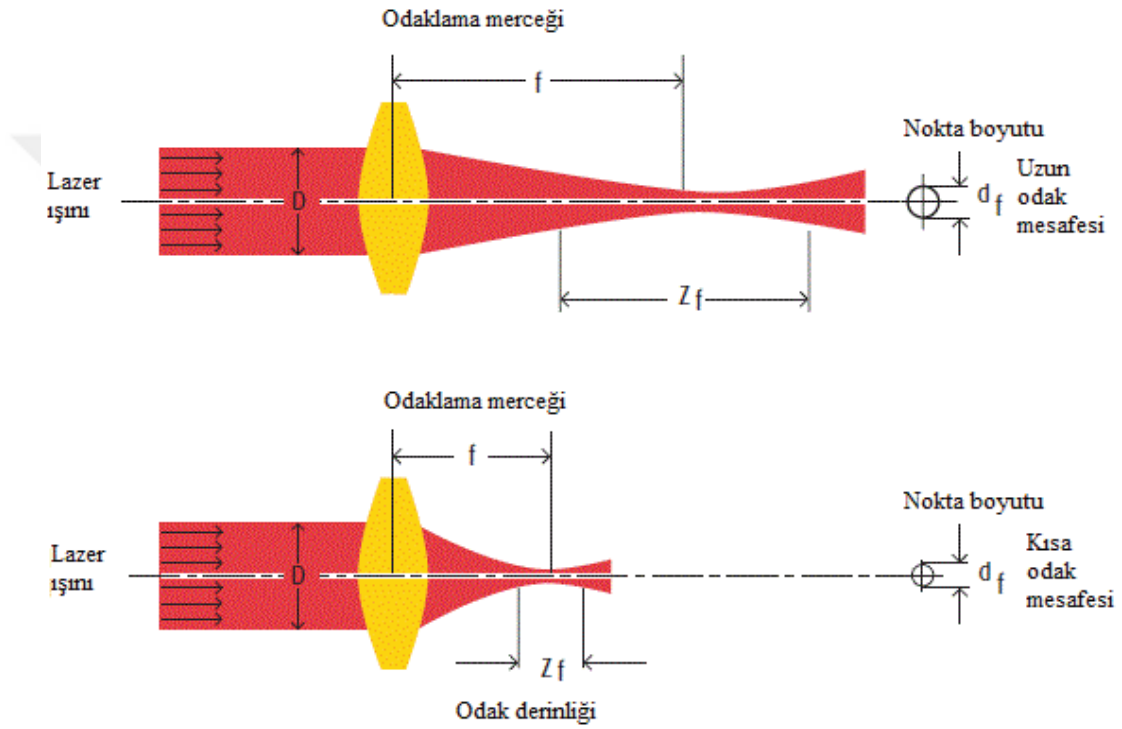
$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{f_1}{f_2} \quad (3.4)$$

3.2. Lazer Işığının Malzeme Kesme İşlemi Esnasındaki Geometrisi

Lazer ışınının malzeme kesimi için kullanıldığı tezgahlarda kesim kalitesinin artırılması için ışığın kesme geometrisinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Malzemenin kalınlığı, kenar kalitesi, minimum güçte maksimum verim gibi kriterler ışın geometrisi tarafından belirlenir. Lazer üreticiden gelen ışık malzemeye gönderilmeden önce bir takım optik işlemlere tabi tutulur. Bu işlemler ışığın minimum saçılma ile malzemeye gönderilmesi ve ışığın malzeme üzerinde minimum

boyutta bir alana odaklanarak yüksek güç yoğunluğunun sağlanması için gerçekleştirilir.

Lazer ışını ham halde malzeme kesme işleminde kullanılamaz. Işının küçük bir noktaya odaklanıp, yüksek güç yoğunluğunun sağlanması gerekir. Mercekler yardımıyla bu işlem gerçekleştirilir. Şekil 3.3'te odaklanmış lazer ışınının karakteristiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Lazer ışığının odaklanması [37]

Ham olarak lazer üreticinden D çapında gelen ışın odaklama merceğine gelir. Işın, odaklama merceğinin fiziki özelliklerine bağlı olarak bir odaklama mesafesi (f) kadar uzağa odaklanır. Mercekler genellikle 0,5 inç ve artan odak mesafelerinde üretilir. Odaklanan ışığın malzemede kesme yapabilecek uzunluğu Z_f olarak adlandırılır. Bu uzunluğun altındaki ve üstündeki ışının çapı, malzemede yeterli güç yoğunluğu sağlayamayacak kadar geniştir. Bu odak derinliği, odak mesafesi (f) yüksek olan merceklerde daha uzundur. Bu mercekler genellikle kalın malzeme kesimlerinde

tercih edilir. Işın yüksek güç yoğunluğunu sağlamak amacı ile d çapına odaklanır. Günümüzde 10 μm seviyelerinde odak çapları elde edilmektedir [37].

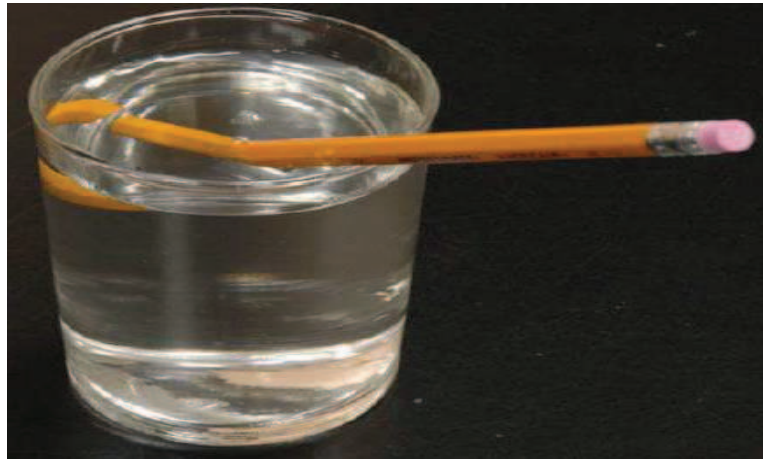
3.3. Işığın Suda Kırılma Prensipleri

Lazer ışığının su jeti içerisine güdümlene işlemini gerçekleştirmek için ışığın su içerisindeki davranışlarının tam anlamıyla tespit edilmesi gerekmektedir.

3.3.1. Fiziksel olgu

Kırılma, ışık veya ses dalgalarının yayılma hızlarının farklılık gösterdiği bileşenler arasında ki geçişlerinde her zaman meydana gelmektedir. Bunu gözle görülür etkisi bir bileşenden diğerine yayımlanan dalga'nın yön değiştirmesidir.

Işık eğer yayımlandığı yüzeyden dik çıkıp çarptığı yüzeye de dik bir şekilde çarparsa, çarptığı yüzeye dik doğrultuda hareketine devam eder. Fakat ışığın yayımlanıp çarptığı iki yüzeyle arasındaki açı 90° 'den farklı ise, ışın ikinci ortamda gözle görülür bir biçimde bükülme meydana gelir.



Şekil 3.4. Günlük yaşamımızda sıkça karşılaştığımız bir kırılma olayı [38]

Saydam bileşen veya malzemenin mutlak kırılma indisi, ışığın boşluktaki hızının malzeme içinden geçerken ki hızıyla arasındaki orandır. Matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikteki (Denklem 3.5) gibi ifade edilir.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te "c" sembolü ışığın boşluktaki hızını, "v" ise ışığın malzeme içindeki hızını temsil etmektedir.

Tablo 3.1. Yaygın kullanılan malzemelerin kırılma indisleri [38]

Malzeme	Kırılma İndisi
Hava	1.0003
Su	1.333
Gliserin	1.473
Batırma yağı	1.515
Cm (konveks mercek)	1.520
Cam (konkav mercek)	1.656
Zirkon	1.920
Elmas	2.417
Kurşun sülfür (galen)	3.910

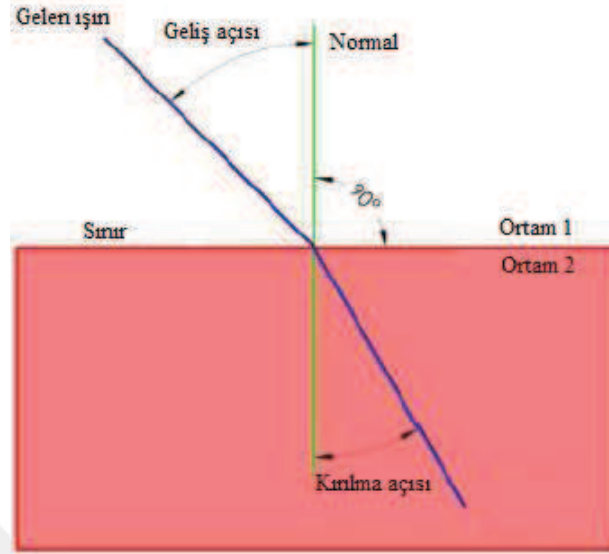
Işığın boşlukta kırılma indisi 1'dir. Kırılma indisleri bilinmeyen malzemeler için karşılaştırma ölçütü olarak boşluğa en yakın kırılma indisine (1,0003) sahip hava kullanılır [38]. Bir malzemenin kırılma indisi ne kadar yüksekse ışığı kırma özelliği, ne kadar düşükse ışığı geçirme özelliği o kadar iyidir.

3.3.2. Kırılma yasaları

Işık, yoğunluğu farklı ortamlar arasında hareket ederken belirli yasalara göre kırılma olayı gerçekleşmektedir. Bu yasalar ışığın kırılma esnasında nasıl bir geometrik davranış sergileyeceğini belirtmektedir. Kırılma yasaları şunlardır;

1. Gelen ışın, normal, kırılan ışın ve ayırma yüzeyi aynı düzlemdedir.
2. Işık ışınları az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçerken normale yaklaşarak kırılır.

3. Çok yoğun ortamdaki az yoğun ortama geçerken yüzeyin normalinden kırılır.



Şekil 3.5. Işığın kırılma parametreleri [38]

İki saydam ortamı birbirinden ayıran yüzeye ayırma yüzeyi denmektedir. Işığın ayırma düzlemine değdiği noktadan bu düzleme çizilen dik doğru normal adını almaktadır. Gelen ve kırılan ışının izlediği yollar ise gelen ışın ve kırılan ışın adını almaktadır. Gelen ışının normal ile yaptığı açıya gelme açısı; kırılan ışının normal ile yaptığı açıya ise kırılma açısı denmektedir. Gelen ışın, normal ve kırılan ışın aynı düzlem içinde yer almaktadır.

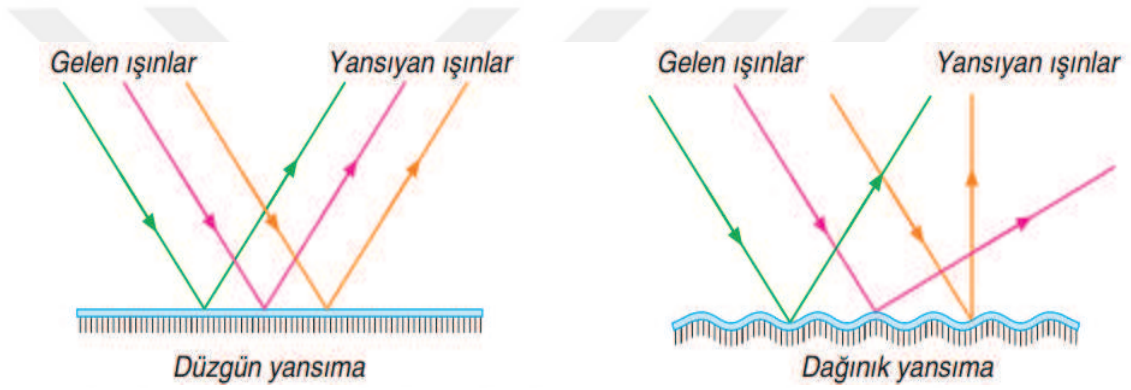
Snell yasası, ışığın geldiği ortamın kırıcılık indisiyle geliş doğrultusunun normalle yaptığı açının sinüsünün, ışığın gittiği ortamın kırıcılık indisiyle gidiş doğrultusunun normalle yaptığı açının sinüsüyle çarpımına eşitlenmesiyle oluşan formüle dayalı fiziğin optik dalında yer alan bir yasadır.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

Denklem 3.6’da belirtilen n_1 ışığın geldiği ortamın kırıcılık indisini, n_2 Işığın gittiği ortamın kırıcılık indisini, θ_1 ışığın geliş doğrultusunun normalle yaptığı açısı, θ_2 ise ışığın kırıldıktan sonraki gidiş doğrultusunun normalle yaptığı açısı ifade etmektedir [39].

3.3.3. Işığın yansımaları

Bir saydam ortamda ilerleyen ışık ışını başka bir ortamın sınırına geldiğinde ışının bir kısmı geldiği ortama geri döner. Işığın bu şekilde yüzeye çarparak doğrultu ve yön değiştirmesine yansıma denir. Işıkların pürüzsüz yüzeydeki yansımalarına düzgün yansıma denir. Düzlem ayna ve durgun su yüzeyindeki yansıma bu tür yansımalara örnektir. Paralel ışık demeti düzgün yansımada yine paralel olarak yansır. Işıkların pürüzlü yüzeydeki yansımalarına dağınık yansıma denir. Dağınık yansımada yüzeye paralel düşen ışık demeti yüzeyden farklı doğrultuda yansımaktadır.

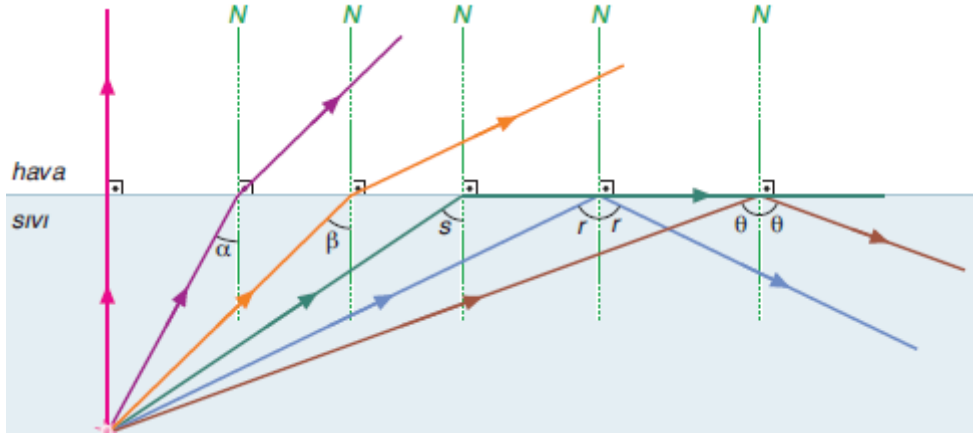


Şekil 3.6. Düzgün yansıma ve dağınık yansıma [40]

Düzgün yansımada görüntü oluşumu gerçekleşir. Dağınık yansımada ise ışınların her yöne dağılmasından dolayı çevremizdeki tüm cisimler aydınlanır. Böylece dağınık yansıma, çevremizdeki cisimleri görmemizi sağlar [40]. Düzgün yansımada ışın geldiği açıyla yansırken dağınık yansımada ise ışın farklı bir açıyla yansımaktadır.

3.3.4. Kritik açı ve toplam iç yansıma

Işık, kırılma indisi daha düşük ortamdan daha yüksek olan ortama her koşulda geçer. Fakat daha yüksek kırılma indisine sahip bir ortamdan daha düşük kırılma indisine sahip bir ortama geçerken, ışığın izleyeceği yol iki ortam arasına çarpma açısı tarafından belirlenir. Işık daha az kırıcı ortama geçemeyip tekrar aynı ortama yansıdığı açı değerine kritik açı denir. Bu olaya da toplam iç yansıma veya tam yansıma denir.



Şekil 3.7. Kritik açı ve tam yansıma [40]

Tam yansıma olayının meydana gelebilmesi için ışığın sınır yüzeyine kritik açı ile gelmesi gerekmektedir. Şekil 3.7’de kırmızı ve mavi ile gösterilen ışık haricindeki ışıkların sınır yüzeyine kritik açıdan daha küçük bir açıyla geldiği görülmektedir. Bu yüzden bu ışınlar tam yansıma gerçekleştirememektedir. Fakat r ve θ açıları ile sınır yüzeyine ışınlar tam yansıma ile aynı ortama geri yansımıştır.

Kritik açının ortamların kırıcılık indislerinin değerlerine bağlıdır. Örneğin su ve hava için sınır açısı 48° iken, cam ve hava için 42° ’dir [40]. Kırıcılık indisi ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir.

BÖLÜM 4. LAZER MİKROJET TEKNOLOJİSİ

4.1. Lazer Mikrojet Teknolojisi

Geleneksel lazer sistemleri çok sert malzemelerin kesiminde yıllardır kullanılmaktadırlar. Fakat su jeti destekli lazer ile karşılaştırıldıklarında birçok dezavantaja sahip oldukları ve su jeti desteğinin yönleme birçok fayda sağladığı görülmüştür.

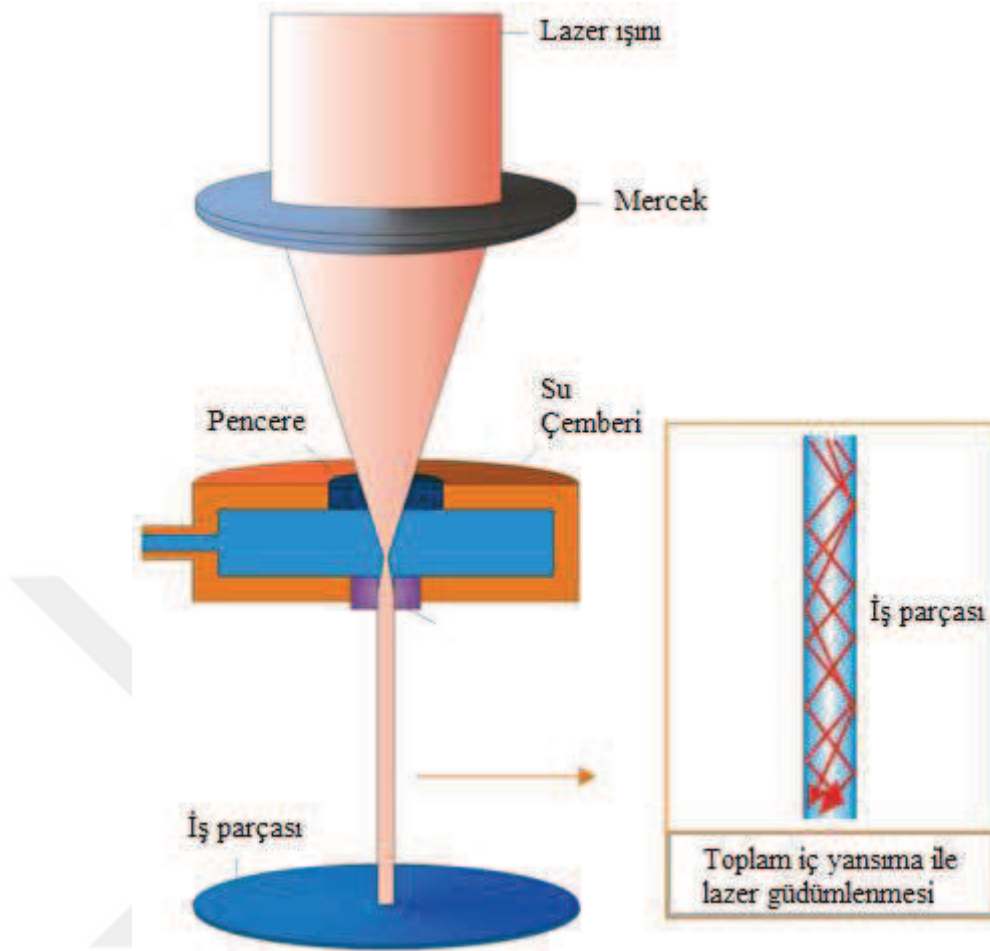
Su jeti destekli lazer son yıllarda elektronik, yarı iletken, saat ve sağlık sektörü cihazlarının parçalarının imalatında kullanılmaktadır. Ayrıca son iki yıldır taş pırlanta endüstrisinde kendini göstermektedir. Bu teknolojinin optik prensipleri Daniel Colladon adlı bir bilim adamının 1841 yılındaki buluşuna dayanmaktadır. Daniel Colladon çalkantısız bir su akışı ile ışığa rota çizdirilebileceğini bulmuştur. Daniel Colladon yaptığı deneyde su akışının içine yönlendirdiği ışığın yalnızca çok küçük miktarda akışın dışına çıkabildiğini ve ışığın akış rotasını takip ettiğini farketmiştir. Daniel Colladon'un akışkan ışık tüpü şekil 4.1'de gösterilmiştir [41].

Günümüzün su jeti destekli lazer sisteminde, su akışının yerini 50 μm çapında bir delikten çıkan tamamen saf bir su huzmesi almıştır. Colladon'un zayıf ışık kaynağının yerini ise yüksek güce sahip YAG lazerler almıştır [41].



Şekil 4.1. Daniel Colladon'un akışkan ışık tüpü [41]

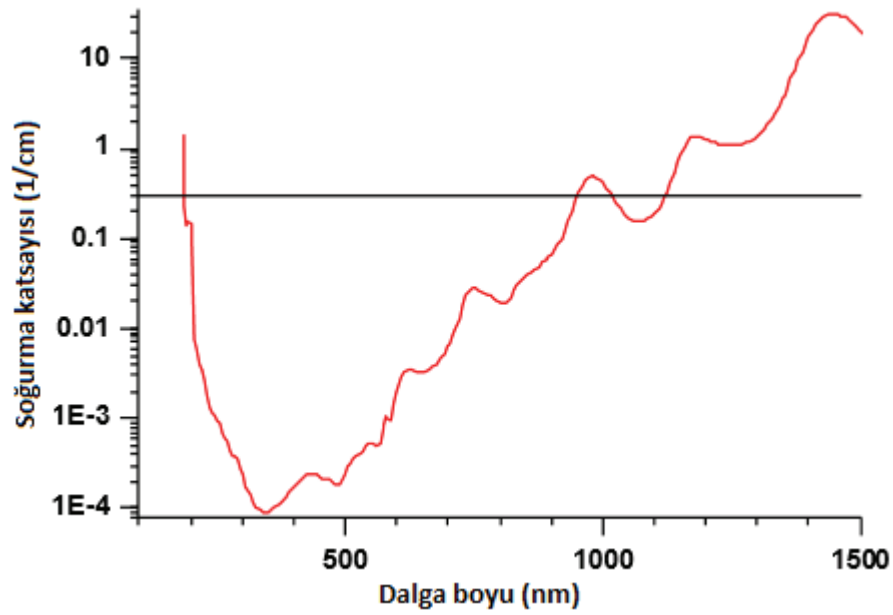
Su jeti destekli lazer kesim teknolojisi keşfedildikten kısa bir süre sonra mikro işleme endüstrisinde kendisini kanıtlamış ve bu endüstride büyük bir etki yaratmıştır. 20-150 μm çapında, düşük sayılabilecek basınç değeri ile meydana getirilebilecek su jeti, bir multimod fiber olarak düşünülebilir. Sistemin çalışma prensibi şematik olarak şekil 4.2'de gösterilmiştir. Yüksek güçlü lazer ışını fiber optik kablolar yardımıyla üreteçten optik kafaya taşınır. Lazer ışını burada su dolu çemberin içerisine mercek ile odaklanır. Işığın kırılmadan su dolu çemberin içerisine girmesini sağlamak amacıyla çemberin üst kısmına kuvars cam yerleştirilmiştir. Tamamen arındırılmış ve de-iyonize edilmiş saf su, su çemberinin içine gönderilir. Su basıncı delik çapına bağlı olarak 50-600 bar arasında seçilir. Daha geniş delik çapları daha düşük su basınçları gerektirmektedir. Tipik delik çapları 20-150 μm arasındadır. Silindirik su jeti delikten çıkmakta ve tam yansıma prensibi ile lazer ışınına kılavuzluk etmektedir. Su jeti kesilecek malzeme yüzeyine vardığında ise kesme bölgesi lazer ışını tarafından buharlaştırılır veya ergitilir [43].



Şekil 4.2. Su jeti destekli lazer sisteminin çalışma prensibi [43]

4.2. Mikrojet Teknolojisinde Kullanılan Lazer Üretici

Mikrojet teknolojisinde jet malzemesi olarak su kullanılması, geçirgenliğinin yüksek olması sebebiyle çok çeşitli lazer türlerinin kullanılmasına olanak vermektedir. Suyun lazer ışınını soğurma katsayısı olarak $0,3 \text{ cm}^{-1}$ sınırı dikkate alındığı takdirde, kızılötesi ($\leq 1120 \text{ nm}$) dalga boylarından mor ötesi ($\geq 190 \text{ nm}$) dalga boylarına kadar geniş bir lazer ışını aralığının kullanılması mümkündür. Şekil 4.3'te suyun mor ötesi dalga boylarından kızıl ötesi dalga boylarına kadar lazer ışınlarını soğurma miktarları grafik ile gösterilmiştir [46].



Şekil 4.3. Suyun farklı dalga boylarında lazer ışınına soğurma miktarı [46]

İlk zamanlar 1064 nm dalga boyunda uzun darbeli lazerler kullanılmıştır. Endüstriyel seviyede lazer üretici için ortalama lazer gücü ve darbe süresi yaklaşık olarak bu dalga boyunda elde edilebilmiştir. Nispeten ince malzemelerin kesiminde daha iyi kenar kalitesi ve daha yüksek kesme hızlarına ulaşabilmek için 1999'dan bu yana Q-anahtarlama kullanılmaktadır [46]. Flaş lamba pompalı ve diyot pompalı kızıl ötesi lazerler de birçok uygulamada kullanılmaktadır. Son yıllarda bunlara ek olarak, yeni bir lazer teknolojisi olan disk lazer ve fiber lazerler de seri imalat işlemlerinde, uygulamaya bağlı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kızıl ötesi dalga boyundaki (1064 nm) lazerler ince malzemelerin hassas işlenmesinde ısıdan etkilenen bölgeyi azalttığı için tercih edilmektedir. Su tarafından soğurulma oranlarının çok az olması sebebiyle frekans çiftlemesi yapılmış, Q-anahtarlamalı diyot pompalı katı hal lazerleri ve disk lazerlerinin kullanımı çoğu su jeti destekli lazer uygulamalarında standart hale gelmiştir. Su tarafından en az soğurulan bölge yeşil renkli lazer bölgesidir. Suyun lazer ışınına soğurma katsayısı (α), en düşük değerini 532 nm civarı dalga boylarında almaktadır. Bu bölgede $\alpha = 4 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ değerindedir. 1064 nm dalga boyunda ise soğurma katsayısı yaklaşık 500 kat artarak $\alpha = 0,2 \text{ cm}^{-1}$ değerine çıkmaktadır. Suyun ışığı geçirme oranı 2,5 cm mesafede 532 nm dalga boyunda %99,9 iken, 1064 nm dalga boyunda bu oran %60'tır. Bu

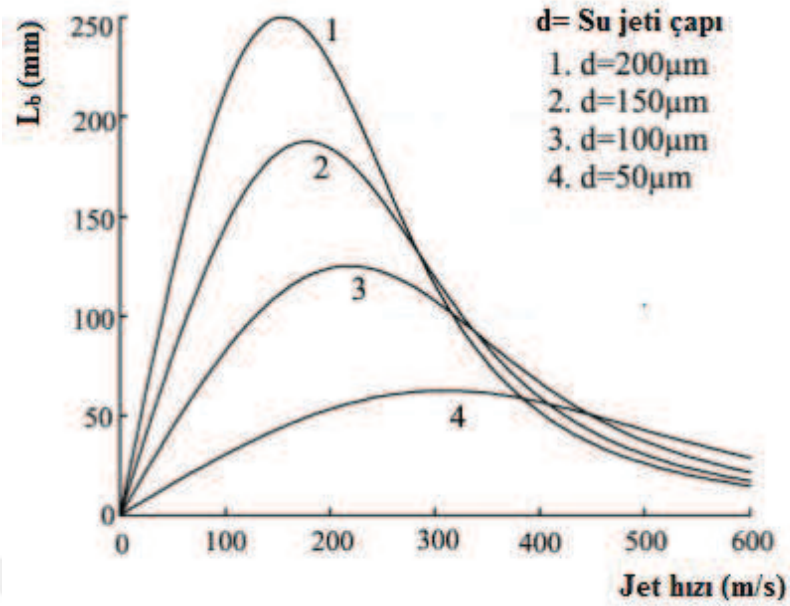
değerlere bakıldığında 532 nm dalga boyunda suyun lazer ışınını soğurması ihmal edilebilecek düzeydedir. 1064 nm dalga boyundaki lazer ışınında ise ortalama güç yaklaşık olarak 200 watt değerinin altında olduğu sürece, suyun ışığı soğurma oranı çok büyük bir sorun teşkil etmemektedir [43].

4.3. Mikrojet Teknolojisinde Stabil Su Jeti Uzunluğu

Su jeti destekli lazer teknolojisinde diğer bir önemli değişken de su jetinin stabil kaldığı uzunluktur. Bu uzunluk, lazer ışının su jeti içerisinden çıkmadan gidebileceği mesafeyi, yani lazer ışın çapının odak noktasından sonra sabit kalabildiği mesafeyi belirler. Stabil su jeti uzunluğu ne kadar uzun olursa, lazer ışını o kadar uzun mesafe boyunca çap ölçüsünü ve buna bağlı olarak güç yoğunluğunu muhafaza eder.

Silindirik sıvı yüzeyi sıvının içerisindeki ve dışındaki gerilmelerden dolayı istikrarlı değildir. Su jeti istikrarının bozulmasının ana sebeplerinden bir tanesi sıvının yüzey gerilmeleridir. Bunun yanında, yüzey gerilmelerine ek olarak jetin hız profili ve jeti çevreleyen atmosfer de stabil uzunluğu doğrudan etkilemektedirler [46].

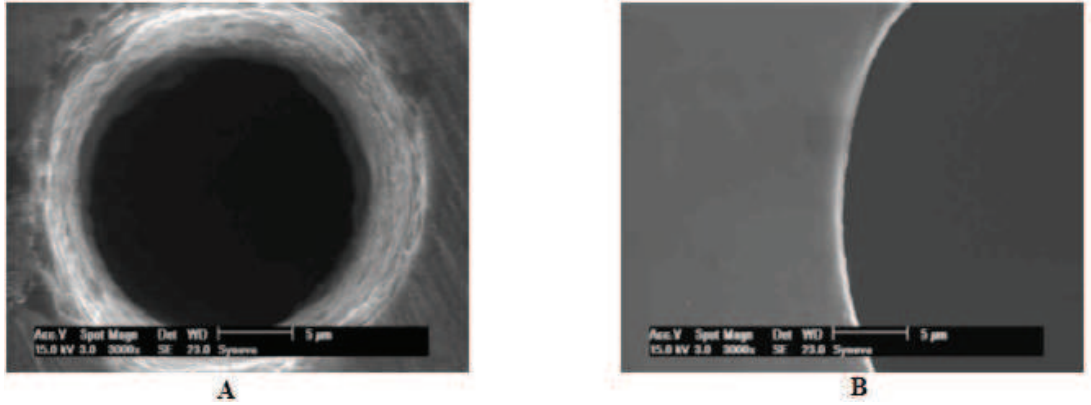
Stabil su jeti uzunluğunun belirlenmesinde, jet yüzeyindeki dalgalanmaların başladığı ve ilk damlanın jetten koptuğu mesafenin doğru belirlenmesi önemlidir. Su jetinin sürekliliğini kaybettiği bu mesafeye dağılma mesafesi (L_b) denir. Yüzey dalgasının aksenal genişleme oranı su jetinin hızına bağlıdır [46]. Şekil 4.4'te jet hızına bağlı stabil su jeti boy değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Farklı su jeti çapları için stabil su jeti eğrileri [46]

Daha büyük su jeti çapları, daha yüksek basınçlar gerektirir. Bununla birlikte su jeti çapı arttıkça elde edilebilecek stabil su jeti uzunluğu artmaktadır. Yüzey dalgalarının boyutu sınır değeri aştığında, su jeti içerisindeki güdümlenmiş ışık saçılmaya başlar [47]. Çalışma mesafesinin sınırı, su jetinin eksenel yönde dağılma mesafesi tarafından belirlenir.

Dağılmanın diğer sebepleri ise su jeti deliğinin yüzey pürüzlülükleri, keskin kenarlı bir delik oluşturulamaması ve delik içinde çapakların olmasıdır. Bu özellikler su jetinin, stabil bir hız profili oluşturamaması sebebiyle delikten ayrılırken dağılmasına sebep olur. Bu gereksinimlerden dolayı günümüzde delik bölgesi, safir yerine keskin kenarlı elmadan imal edilmektedir. Bunlara ek olarak elmas, lazer darbelerine karşı yüksek termal gerilme dayanımı ve daha yüksek ısı iletkenliği sebebiyle tercih edilmektedir [46]. Şekil 4.5'te zayıf kenar kalitesi ve iyi kenar kalitesine sahip delikler gösterilmiştir.



Şekil 4.5. A) Çap ölçüsü: 20μm, kenar kalitesi zayıf, yüzey pürüzlülüğü yüksek delik görüntüsü, B) Çap ölçüsü: 50 μm, keskin kenarlı, yüzey pürüzlülüğü düşük delik görüntüsü [46]

4.4. Mikrojet Teknolojisinde Malzeme Kesimi Uygulamaları

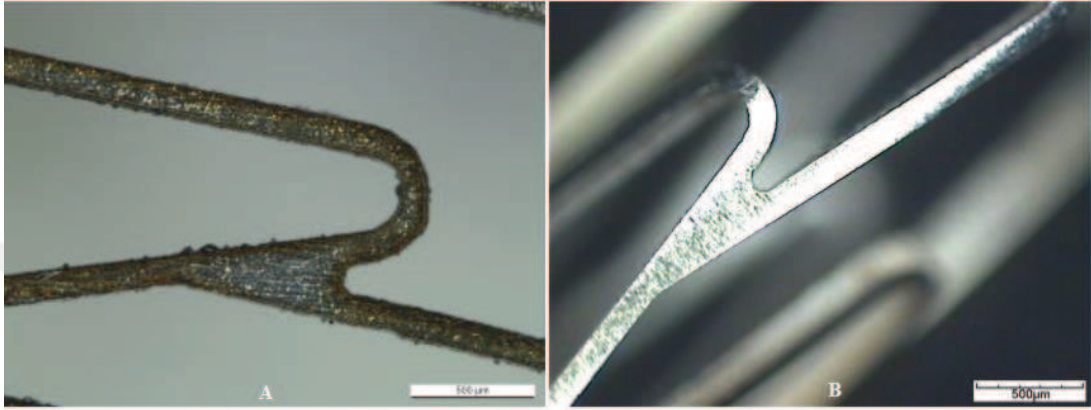
Geleneksel yöntemde kesme gazı kerf bölgesinde dalgalanmalara sebep olduğundan çok ince malzemelerde kesme kalitesi düşmektedir. Su jeti destekli lazer teknolojisi, ince malzemelerin hassas kesiminde geleneksel yönteme göre birçok avantaj ortaya koymaktadır.

4.4.1. Stentler

Lazer mikrojet teknolojisi tıbbi cihazlar alanında, özellikle stent üretiminde kendini göstermiştir. Stent, anjiyoplastiden sonra temizlenen atardamarların tekrar daralma ihtimalini azaltması için kullanılan çok ince metal örgü bir kafestir. Bir balon kateter üzerine yerleştirilmiş olan stent, daralma beklenen bölgeye yerleştirilir. Burada balon kateter şişirilir ve stent damarın açık kalmasını sağlar [43].

Stentler çeşitli kalınlık ve çaplarda titanyum, paslanmaz çelik veya nitinol malzemeden düz levha veya tüp şeklinde üretilir. En yaygın olarak AISI 316 kalite paslanmaz çelikten imal edilirler. Düz levha biçimli üretilip daha sonra bükülüp kaynatılarak imal edilen stentlerde malzeme kalınlığı 100 μm ve 200 μm arasındadır. Doğrudan tüp biçimli üretilen stentlerde tüp çapı 1 mm ve 5 mm arasında, tüpün duvar kalınlığı ise 30 μm ve 600 μm arasındadır [43].

Geleneksel Nd:YAG lazerle yapılan kesme işlemlerinde stent yüzeyinde oksit tabakası kalmaktadır. Ayrıca örgü tellerinin çapları küçük olduğundan lazer ışınının difüzyonu sonucu yeniden ergime söz konusudur. Bu nedenlerden ötürü stent yüzeyinde pürüzler ve kalıntılar oluşur [43]. Şekil 4.6’da geleneksel kuru lazer ve lazer mikrojet ile kesilmiş stentlerin mikroskop ile çekilmiş görüntüsü verilmiştir.



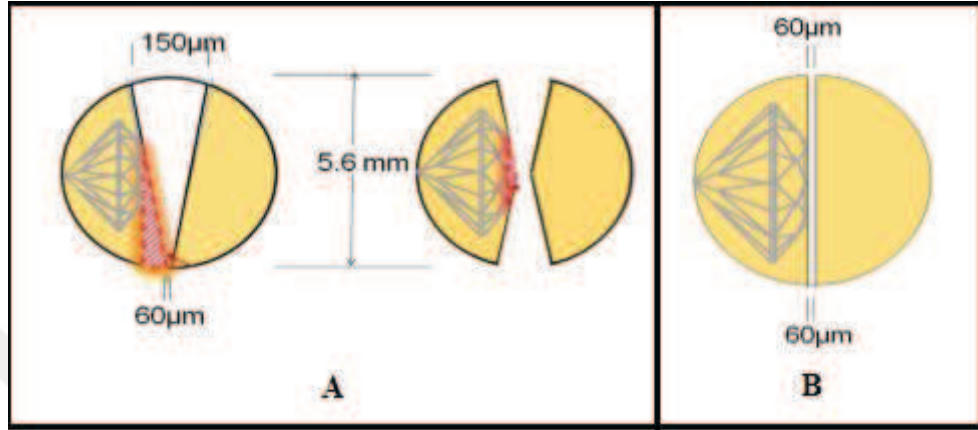
Şekil 4.6. A) Geleneksel kuru lazer ile kesilmiş stent görüntüsü B) Lazer mikrojet yöntemi ile kesilmiş stent görüntüsü [43]

İki yöntem karşılaştırıldığında su jeti destekli yöntem daha yüksek kesme kalitesi, paralellik ve düşük yüzey pürüzlülüğü ortaya koymuştur. Özellikle termal hasarlar su jeti destekli lazer yönteminde geleneksel yöntemle göre çok daha düşüktür. Stent malzemeleri, kızılötesi dalga boyundaki lazer ışınını mükemmel soğurma yeteneğine sahip olduğu için etkili bir kesim gerçekleşmektedir. Kesimde ortalama 23 W güce sahip diyot pompalı 1064 nm dalga boyunda lazer kullanılmıştır ve kesme hızı 9 mm/s’dir. Su jeti delik çapı 30 µm ve su basıncı 300 bar değerindedir. Su jeti malzemeyi devamlı olarak soğutmuş ve bu sayede yeniden ergime meydana gelmemiştir [43].

4.4.2. Elmas kesimi

Su jeti destekli lazer, elmas kesim işlemlerinde geleneksel kuru lazer yönteminin yerini hızla almaktadır. Geleneksel kuru lazer, elmas kesiminde V tipi bir kerf boşluğu oluşturur ve bunun yanında termal gerilme yığılmalarına ve buna bağlı olarak çatlaklara sebep olur. Su jeti destekli lazer yöntemi paralel ve daha az pürüzlü

bir kerf meydana getirmektedir. Bu nedenle kesim sonrası parlatma ve düzeltme işlemleri için harcanan zaman daha azdır. Su jetinin kesme bölgesini sürekli soğutmasından dolayı termal gerilme yığılmalarının sebep olduğu çatlama riski %50 oranında azaltılmıştır.

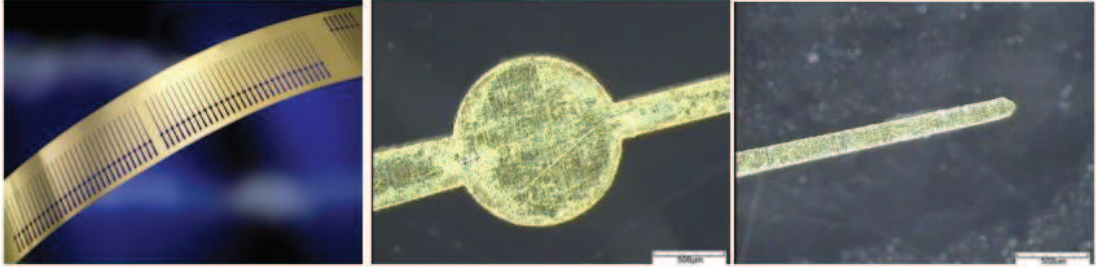


Şekil 4.7. A) Geleneksel kuru lazer ile oluşturulmuş ve ilave taşlama işlemi gerektiren V tipi kerf boşluğu B) Su jeti destekli lazer yöntemi ile 25 mm derinliğe kadar paralel bir şekilde oluşturulmuş kerf boşluğu [41]

Elmas kesme işleminden sonraki son yüzey kalitesi tel erozyon yöntemine göre daha iyidir. Genel olarak ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0,3 µm değerindedir. Alüminyum alaşımlarını işlemede kullanılan elmas kesici takımlar, su jeti destekli lazer ile imal edilse dahi, kesici takım kenarında atık malzeme birikme problemi sebebiyle daha keskin ve daha düzgün kenar kalitesi elde etmek için son işlem olarak bileme işlemi yapılmaktadır [41].

4.4.3. Saat parçası işleme uygulamaları

Saat mekanizmalarında kullanılan parçalar, boyutlarının çok küçük olması sebebiyle hassas işleme teknikleri gerektirmektedir. Çoğunlukla pirinç ve çelik malzemeden yapılan bu parçaların imalatında geleneksel kuru lazer kesim yöntemi çok iyi sonuçlar vermemektedir. Kesimde meydana gelen yüksek sıcaklığın etkisi ile parça kenarında atık malzeme birikmesi işlem kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden kesme işleminden sonra ilave bazı işlemler gerekmektedir [42].

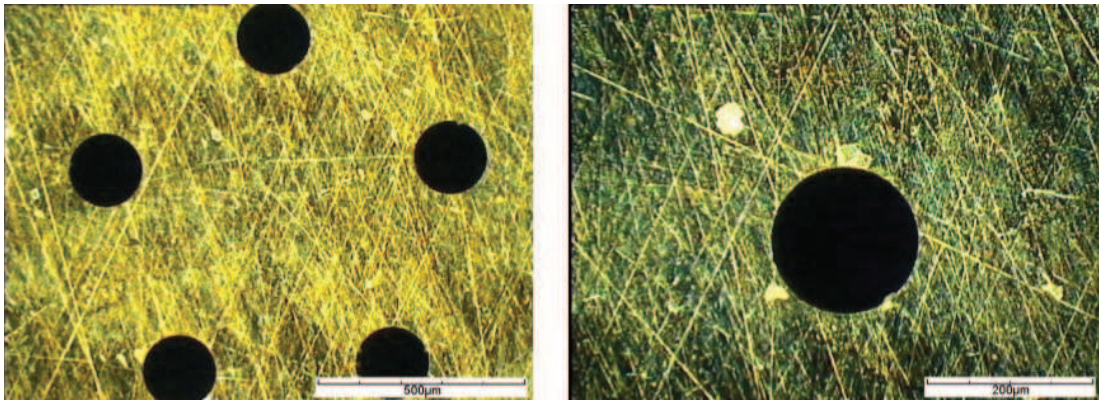


Şekil 4.8. Lazer mikrojet ile kesilmiş saat ibresi görüntüsü [42]

Şekil 4.8’de 200 μm kalınlıkta pirinç malzemedan, su jeti destekli lazerle kesilmiş saat ibresi görülmektedir. Yapılan kesimde 532 nm dalga boyunda ve 40 W ortalama güce sahip darbeli Nd:YAG lazer kullanılmıştır. Sistemde su jeti çapı 40 μm ve su jeti basıncı 280 bar değerindedir [42].

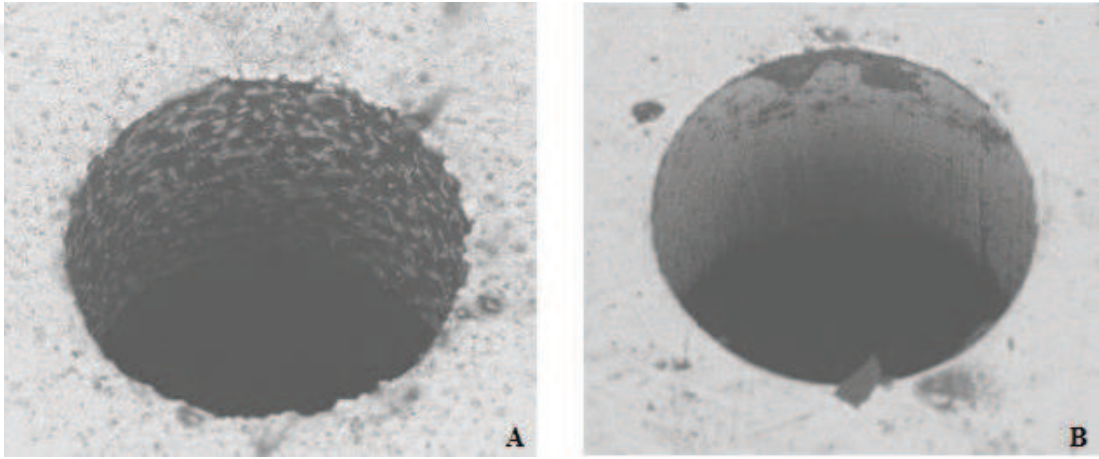
4.4.4. Yakıt püskürtme deliği uygulamaları

Yakıt püskürtme cihazları, yanma odasına optimum düzeyde yakıt transferi sağlamak için kullanılır. Yakıt, püskürtme deliğine yüksek basınçla nakledilir ve bu delikten püskürtülerek parçacıklar halinde yanma odasına gönderilir. Yakıt burada uygun miktarda hava ile karıştırılarak yanma işlemi etkin bir şekilde gerçekleştirilir. Püskürtme delik çapı ve derinliği, arzu edilen yakıt debisine, hızına ve basıncına göre belirlenir. Püskürtme deliği, istenen hassasiyete bağlı olarak genellikle $\pm 2 \mu\text{m}$ toleransla 180-260 μm çapa ve 120-220 μm derinliğe sahiptir. Parça malzemesi olarak aşınma direnci yüksek olan AISI 440 ve paslanmaz çelik kullanıldığından işleme şartları oldukça zordur [42].



Şekil 4.9. Su jeti destekli lazer teknolojisi ile delinmiş ve 30 μm çap ölçüsüne sahip yakıt püskürtme deliği [42]

Şekil 4.9’da su jeti destekli lazer teknolojisi ile delinmiş yakıt püskürtme deliği görülmektedir. Delme işleminde kısa dalga boylu lazer ışınının meydana getireceği geniş ısı tesiri altındaki bölgeyi azalmak amacıyla diyot pompalamalı, darbeli ve 1064 nm dalga boyuna sahip Nd:YAG lazer ışını kullanılmıştır. Delik kalitesini en iyi seviyeye çıkartmak için darbe frekansı, darbe uzunluğu ve ortalama güç gibi parametreler en uygun şekilde ayarlanmıştır. Su jeti delik çapı 30 μm ve su basıncı 350 bar olarak belirlenmiştir [42]. Şekil 4.10’da elektro erozyon ve su jeti destekli lazer ile delinmiş yakıt püskürtme delikleri gösterilmiştir. Delik içi yüzey kalitesi su jeti destekli lazerde elektro erozyon yöntemine göre daha iyidir.



Şekil 4.10. A) Elektro erozyon yöntemi ile delinmiş yakıt püskürtme deliği, B) Su jeti destekli lazer ile delinmiş yakıt püskürtme deliği [42]

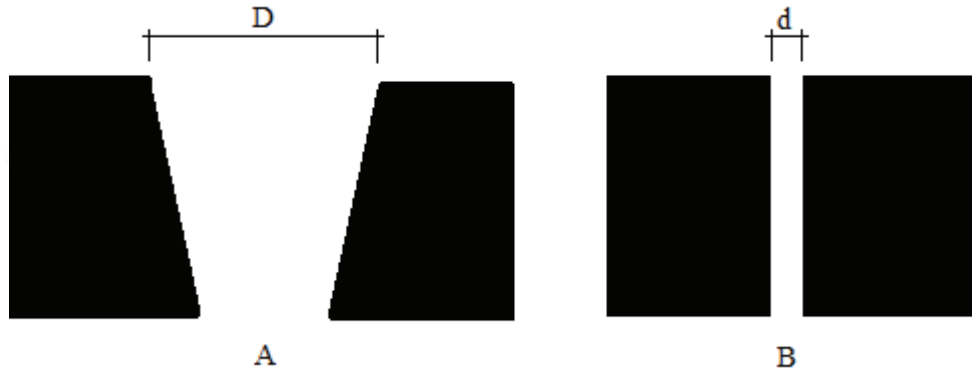
4.5. Su Jeti Destekli Lazer Yönteminin İmalatta Sağlayacağı Avantajlar

Endüstride lazer ile kesimin kullanıldığı alanlar oldukça yaygındır ve kullanım sahaları genellikle seri imalat işlemleridir. Seri imalat işlemlerinde üretilen adet in çok olmasından ötürü işleminde yapılan en küçük iyileştirmenin bile çok büyük faydaları olmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen dar bir su jetine lazer ışınının güdümlenmesi yöntemi, ürün kalitesine ve işlenecek ürün çeşitliliğine doğrudan veya dolaylı olarak çok önemli faydalar sunmaktadır.

1. Malzeme kesiminde kerf aralığının paralel oluşmasını sağlar. Geleneksel yöntemde ışının odak noktasından sonra tekrar açılması kerf aralığının

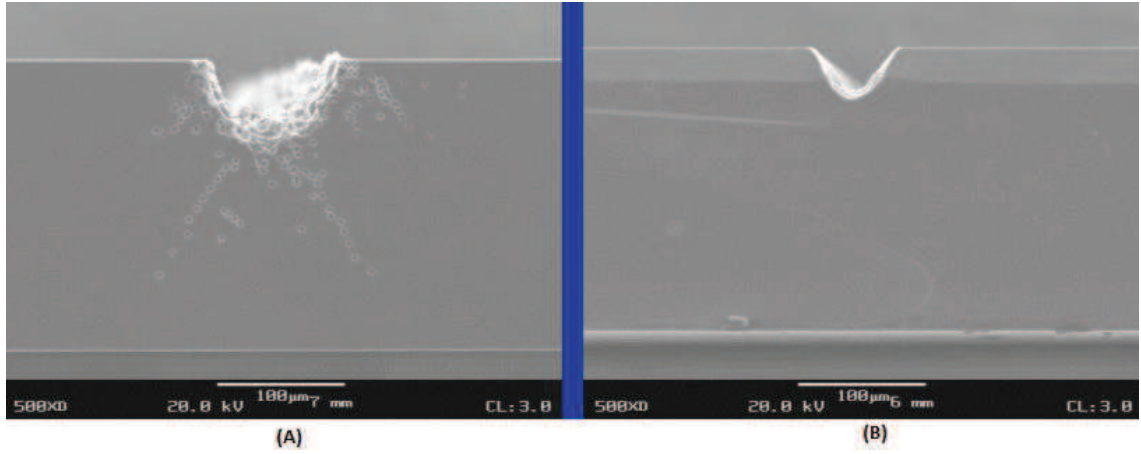
açılı olmasına sebep olur. Kalın kesitli malzemelerde bu daha da belirginleşir. Fakat su jeti ile güdümlene yönteminde ışın dar su jeti çeperlerinin dışına çıkamadığı için kerf aralığı da paralel oluşmaktadır.

2. Geleneksel matkap ile delik delme işlemlerine benzer bir şekilde lazer kesim işlemlerinde de en-boy oranı önemlidir. Lazer ışınının malzemenin içerisinde kalınlaşması güç yoğunluğunun azalmasına sebep olmaktadır. Güç yoğunluğu azalan ve kalınlaşan ışın malzemede kesme görevini yerine getiremez ve kerf boyunca yakma işlemi yapar. Bunun sonucunda kerf aralığında genişleme meydana gelir. Fakat su jeti güdümlene yönteminde ışın su jetinin içerisinde çıkamadığından böyle bir sorun bu yöntemde yaşanmamaktadır. Nozul delik çapı ne kadar dar ise kerf aralığı da o kadar dar oluşmaktadır. Günümüzde yeni geliştirilen teknolojiler ile çok küçük çapta nozul deliklerinin delinmesi mümkündür.



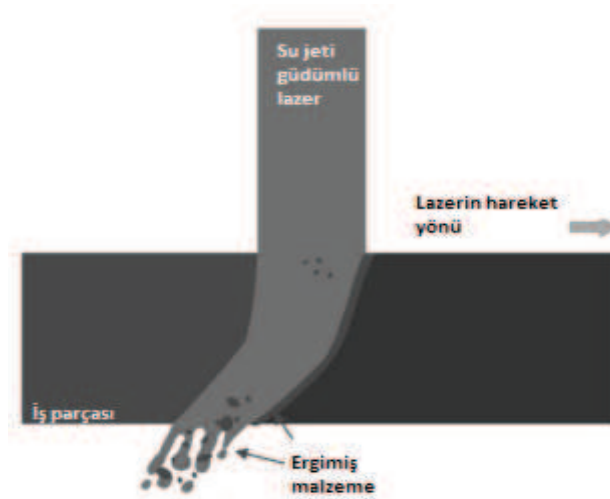
Şekil 4.11. A) Geleneksel lazer kesim yönteminde sınırlı en-boy oranı, B) Su jeti güdümlene yöntemi

3. Lazer ile kesme işlemi malzemeye çok yüksek ve yoğun bir enerji uygulanması ile gerçekleşmektedir. Bu yoğun enerji malzemede ısı enerjisine dönüşür ve malzeme hızla ısınmaya başlar. Kalın kesitli ve ergime derecesi yüksek malzemelerin kesiminde geniş bir ısıdan etkilenen bölge oluşur. Yüksek sıcaklık sebebiyle içyapıda meydana gelen değişiklikler daha geniş bir alana yayılır. Fakat su jeti ile güdümlene yönteminde lazer ışını su ile birlikte malzemeye yönlendirildiğinden ısı tesiri altındaki bölge oldukça dardır. Bu sayede termal hasarların oluşumu ve malzemenin içyapısında oluşan değişiklikler minimize edilmiş olur.



Şekil 4.12. A) Geleneksel yöntemde meydana gelen geniş ısıdan etkilenen bölge, B) Su jeti güdümlü lazer yönteminde meydana gelen dar ısıdan etkilenen bölge [42]

4. Lazer ile kesme işlemi esnasında ergiyen malzeme kesme bölgesinden uzaklaştırılamadığından kerf duvarına yapışmakta ve kerf tabanında birikmektedir. Su jeti güdümlü lazer yönteminde basınçlı su jetinin kinetik enerjisi ergimiş malzemeyi kerf bölgesinden uzaklaştırarak birikmeyi önler. Böylece daha kaliteli bir kesim gerçekleştirilir. Şekil 4.13'te su jetinin atık malzemeyi kerf boşluğundan uzaklaştırması görülmektedir.



Şekil 4.13. Su jeti destekli lazer yönteminde ergimiş metalin basınçlı su jeti ile kesme bölgesinden uzaklaştırılması [43]

5. Her yeni malzeme kalınlığında, yeni odak ayarı yapılma zorunluluğunu ortadan kaldırmaktadır.
6. Değişken odak mesafesi gerektiren malzemelerin belirli sınırlar içerisinde yeni bir odak mesafesi ayarı yapılmaksızın işlenmesine imkan vermektedir. Lazer ışınının odaklandıktan sonra tekrar açılmasını engelleyerek ışının su jeti çapına eşit çapta ilerletilmesiyle suyun dağılma mesafesine kadar kesim gerçekleştirilir.

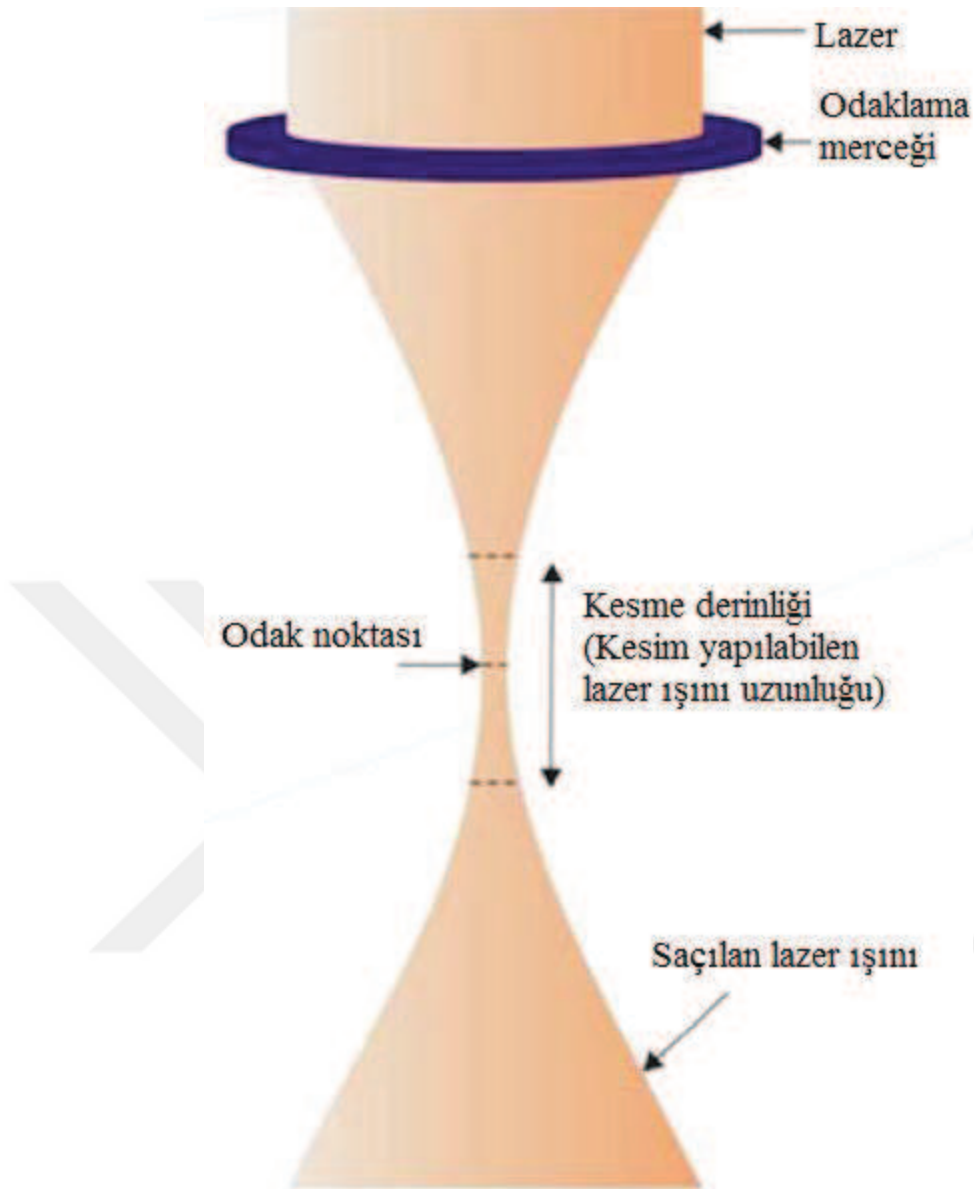


BÖLÜM 5. MATERYAL, YÖNTEM VE BULGULAR

5.1. Sistemin Amacı

Lazer teknolojisinin endüstrideki uygulama alanlarından en önemlisi malzeme kesme uygulamalarıdır. Geleneksel yöntemlerle kesimi oldukça büyük kuvvetlerin yenilmesini gerektiren malzemeler, günümüzde mühendislik alanında sıkça kullanılmaktadır. Lazer teknolojisi bu malzemeleri kuvvet ve kesici aşınması olmaksızın kesme imkanı vermektedir. Fakat geleneksel yöntemlerin bir takım sınırlılıkları olduğu gibi lazer ile kesme metodunun da sınırlılıkları vardır. Lazer ile kesme metodunda var olan en önemli sorun lazer ışınının bir mercek vasıtasıyla odaklanmasından sonra odak noktasından itibaren ışığın tekrar saçılmasıdır. Işığın tekrar saçılması kalın kesitli malzemelerde güç yoğunluğunun malzeme tabanına kadar aynı kalamamasına ve böylece belirli kalınlıklardan sonra malzemenin kesilememesine yol açmaktadır.

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi lazer ışını odak noktasında en küçük alana etkinken daha sonra bu alan giderek atmaya başlamaktadır. Kesme derinliği diye ifade edilen uzunluk ise ışının kalınlığının malzemeyi kesmeye yetecek güç yoğunluğunu karşıladığı uzunluktur. Bunun üstünde ve altında kalan kısımda yeterli güç yoğunluğu sağlanamadığı için kesme işlemi gerçekleştirilemez.



Şekil 5.1. Lazer ışınının odaklanması ve saçılması [44]

Lazer kesme teknolojisinde genellikle düz yüzeye sahip sac levhaların kesimi yapılmaktadır. Bu yüzden genellikle iki eksenli makinaların yeterli olduğu söylenebilir. Fakat farklı formdaki, farklı bölgelerinde kesit kalınlıklarının değişiklik gösterdiği malzemelerin kesilmesi üçüncü bir eksen mecbur kılar. Bu üçüncü eksen kesme işlemi esnasında, malzeme kesitinin artması veya azalmasını algılayan bir algılayıcı ile birlikte çalışmalı ve çok seri bir şekilde algılayıcıdan gelen sinyale göre düşey ekseninde pozitif veya negatif yönde hareket ederek odak mesafesi değişikliklerini telafi etmelidir. Bu aradaki otomatik kontrol işlemleri yüksek hızda yapılan kesimlerde sorun çıkarabilir. Bunun yanında kesilecek yüzey önceden

taratılıp, CAM kodları türetilerek işlem gerçekleştirilebilir. Bu çözümde de zaman kayıpları kaçınılmazdır.

Yöntemdeki kısıtlamalar tek bir şekilde ortadan kalkabilmektedir ve bu da ışığın yeniden saçılmasını önleyip ışığın düz bir şekilde malzemeye gönderilmesini sağlamaktır. Lazer ışını odaklandıktan sonra bir daha saçılmamalı, odak mesafesi ve malzeme kesit kalınlığı boyunca ışığın kalınlığı istenen çapta kalmalıdır. Bu çalışmada bu kısıtlamaların aşılması için ışının ince bir su jetine hapsedilmesiyle düz bir şekilde hareketine devam etmesi sağlanması amaçlanmaktadır. Böylece ışın saçılmadan hareket edeceği için daha kalın malzemeler rahatlıkla kesilebilecek ve üzerinde kesit değişiklikleri olan malzemelerin kesiminde sürekli geri beslemeli sistemlere ve üçüncü eksen takımına gerek duyulmayacaktır.

5.2. Sistemde Kullanılan Parçaların Tanıtılması

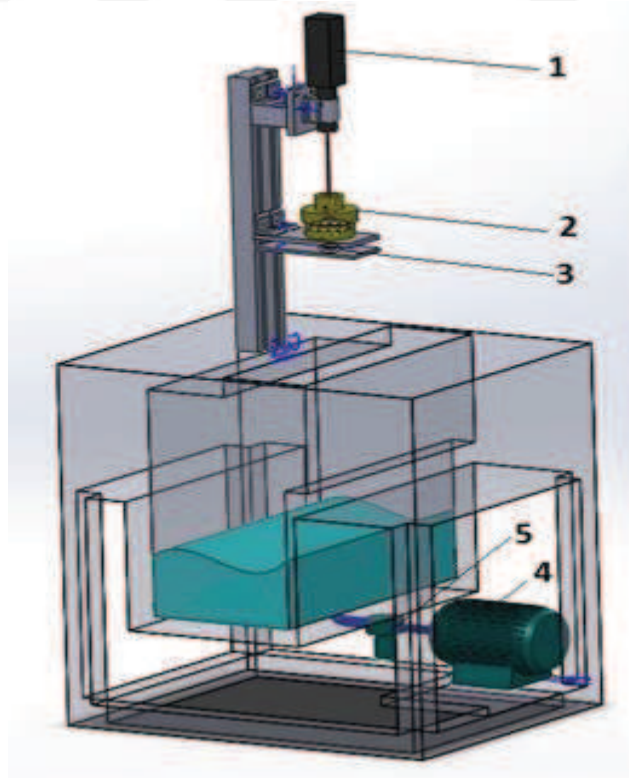
Lazer ışınının küçük çaplı bir su jeti içerisine güdümlene deneyi için hazırlanan düzenekte hazır ve farklı imalat yöntemleri ile üretilmiş parçalar bulunmaktadır. Düzenekteki parçaların seçimi, istenilen özelliklere göre önceden yapılmış hesaplamalar ve testler ile belirlenmiştir.

Şekil 5.3'te izometrik görünüşü verilen deney düzeneğinin önemli kısımları şunlardır;

1. Işın genişletici
2. Su jeti başlığı
3. Deney malzemesi (PMMA)
4. Su pompası
5. Filtre



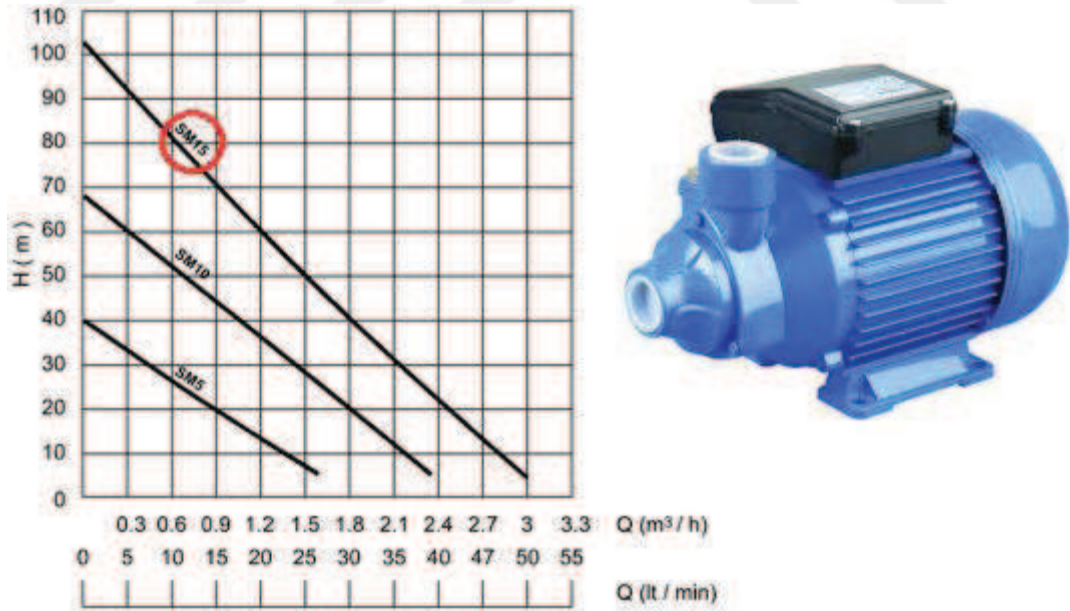
Şekil 5.2. Deney düzeneği



Şekil 5.3. Deney düzeneği şematik görünüm

5.2.1. Su pompası

Su pompası, ünitenin en önemli aksamlarından biridir. Lazer ışınının güdümleneceği su jetini meydana getiren, ışının temas ettiği bölgedeki termal gerilmeleri azaltan suyu tedarik edecek elemandır. Işının kesme yüzeyine ve kesme alt yüzeyine kadar su jetinin içinde gönderilmesinin istenildiği bu sistemde, bu su basıncını karşılayacak bir pompa kullanılması gerekmektedir. Ayrıca suyun çıkış yapacağı nozul deliği 0,2 mm çapa sahip olduğu için burada da akışta bir zorlama vardır. Pompa seçimi yaparken tüm bu parametrelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çalışmada, su jeti başlığına manuel bir pompa ile su basılarak nozul deliğinden çıkan su jeti uzunluğunun, deney mesafesini sağladığı andaki basınç değeri manometreden okunarak belirlenmiştir. 9 bar su basıncı, suyun 6-10 mm dağılmadan ilerleyebilmesini sağlayabilmektedir. Fakat sistemdeki suyun filtrasyon işlemi basınç kayıplarına sebep olmaktadır. Bu kayıplar göz önüne alındığında gerekli pompa basıncı 10 bar olarak belirlenmiştir. Buna bağlı olarak SUMAK SM-15 preferikal pompa tercih edilmiştir.



Şekil 5.4. Sumak SM-15 modeli preferikal pompa basınç-debi değerleri [45]

Şekil 5.4'te basınç-debi diyagramından da görüldüğü üzere sistemin gerektirdiği 10 bar basınçta, seçilen pompa yaklaşık 0,02 lt/dk debi sağlamaktadır. Bu debide su jeti

hızı 10 m/s değerindedir. Bu hız değeri 6-10 mm stabil su jeti uzunluğunu sağlamak için uygundur.

5.2.2. Lazer üretici

Bu sistemde lazer üretici dalga boyu esas alınarak seçilmiştir. Çünkü kullanılacak lazer ışınının suyun içerisinde geçebilmesi gerekmektedir. 10,6 μm dalga boyuna sahip CO₂ lazer ışını, dalga boyu yüksek olduğundan suyun içinden geçememektedir. Suyun içinden geçebilecek dalga boyuna sahip olan lazer ışınları endüstride çokça kullanılan Nd:YAG lazer ve fiber lazerleridir. Bu tür lazer ışınlarının dalga boyları 1,06 μm dolaylarındadır. Bu sistemde deneysel amaçlı olarak 20W fiber lazer kullanılmıştır.

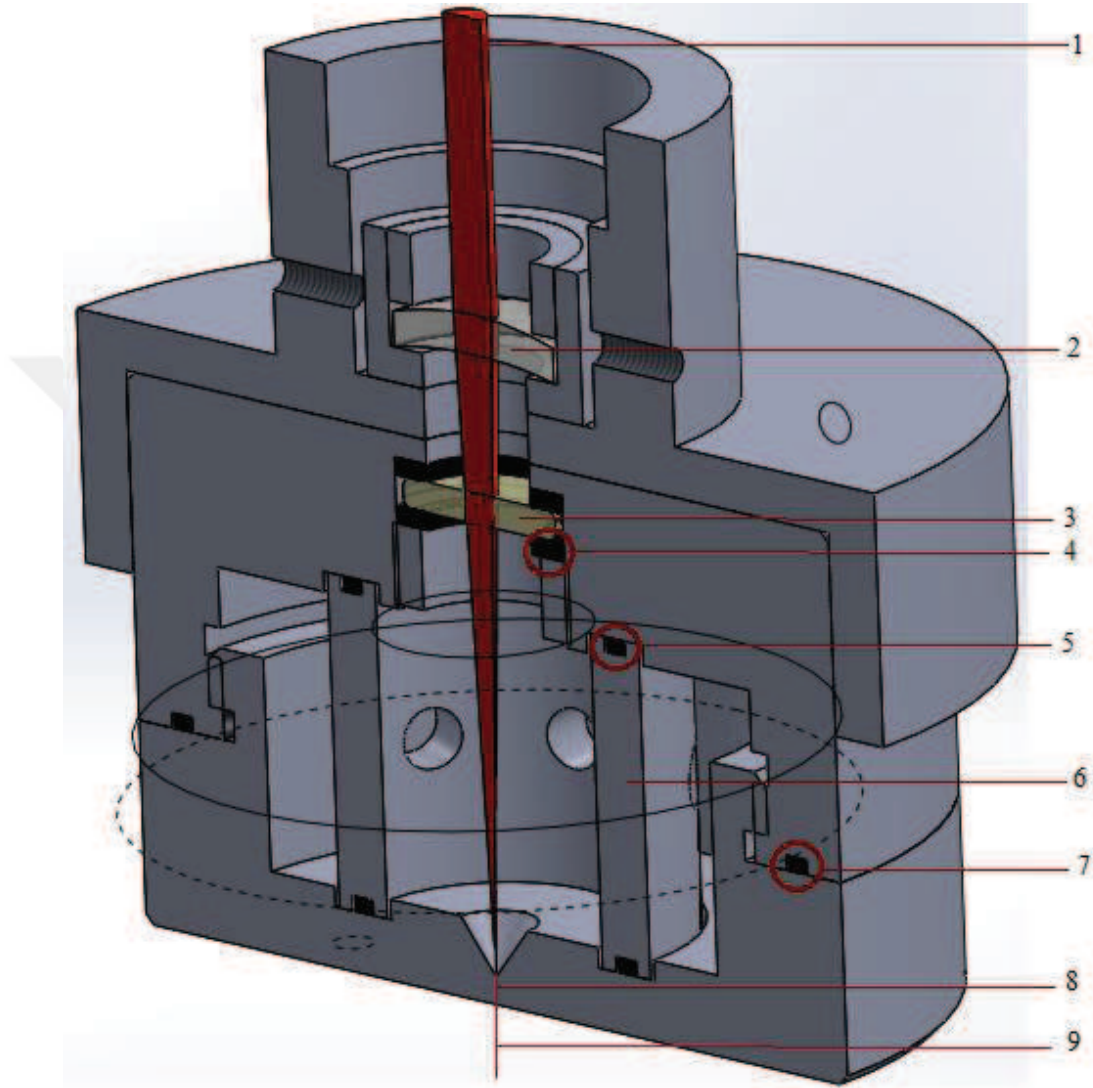


Şekil 5.5. 20W Fiber lazer üretici

5.2.3. Su jeti başlığı

Bu sistemde su jeti başlığı, suyu 0,2 mm çapta bir delikten geçirerek su jetinin oluşumunu ve odaklanmış lazer ışınının su jeti ile aynı delikten aynı eksenle çıkmasını sağlamaktadır. Su jeti başlığı sistemin birleştirici aksamıdır. Su ve lazer ışını burada birleştirilir ve sistemin esas amacı burada gerçekleştirilir. Su jeti başlığının sürekli su ile temas halinde olmasından ötürü paslanmaz çelik malzemeden yapılması gerekmektedir. Bu yüzden AISI 304 paslanmaz çelik

kullanılmıştır. Şekil 5.6’da su jeti başlığının kesit görünüşü verilmiştir. Su jeti destekli lazer sisteminde kullandığımız fiber lazer için su ortamından hava ortamına sınıır açısı $48,95^\circ$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.6. Su jeti başlığı kesit görünüşü

Şekil 5.6’da kesit görünüşü verilen su jeti başlığının önemli kısımları şunlardır;

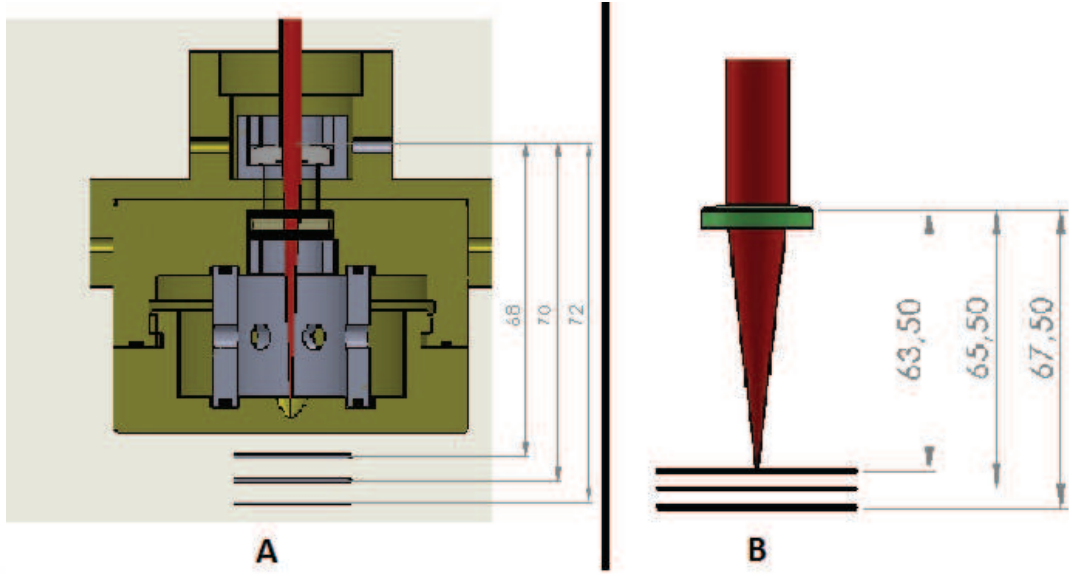
1. Lazer ışını
2. Odaklayıcı mercek
3. Kuvars pencere
4. O’ring (18x2)

5. O'ring (31x2)
6. Türbülans azaltıcı bilezik
7. O'ring (79x2)
8. Ø 0,2 mm nozul deliği
9. Güdümlemiş lazer ışını

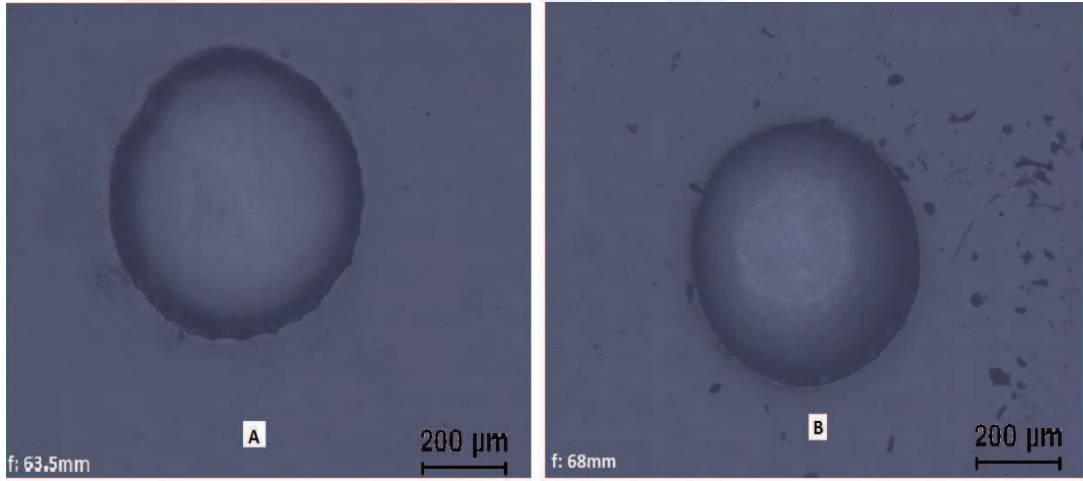
Fiber lazer ışınının nozul deliğinin başlangıcına odaklanması amacı ile 63,5 mm odak mesafesine sahip mercek kullanılmıştır. 3 numaralı kuvars pencere lazer ışınının su çemberinin içerisine hiçbir optik değişim göstermeden girmesini sağlamaktadır. 4, 5, 7 numaralı O'ring sızdırmazlık elemanları, su jeti çemberinin içerisinde oluşan basınçlı suyun sızmasını önlemek için kullanılmıştır. 6 numaralı türbülans azaltıcı bilezik, pompadan gelen su akışının çember içerisinde nozul deliği ile aynı ekseninde toplanması, içerideki türbülansın bir miktar azaltılması amacıyla yerleştirilmiştir. 8 numaralı kısım su çemberinin nozul deliğidir. Delik 0,2 mm çapa ve 3 mm uzunluğa sahiptir. Deliğin lazer ışınıyla aynı ekseninde olması çok büyük önem arz etmektedir. Malzemenin sert, delik çapının çok küçük olması sebebiyle mekanik yöntemlerle delinmesi mümkün olmamaktadır. Bu yüzden dalma erozyon teknolojisi kullanılarak yüksek hassasiyetle delme işlemi gerçekleştirilmiştir.

5.3. Deneysel Sonuçlar

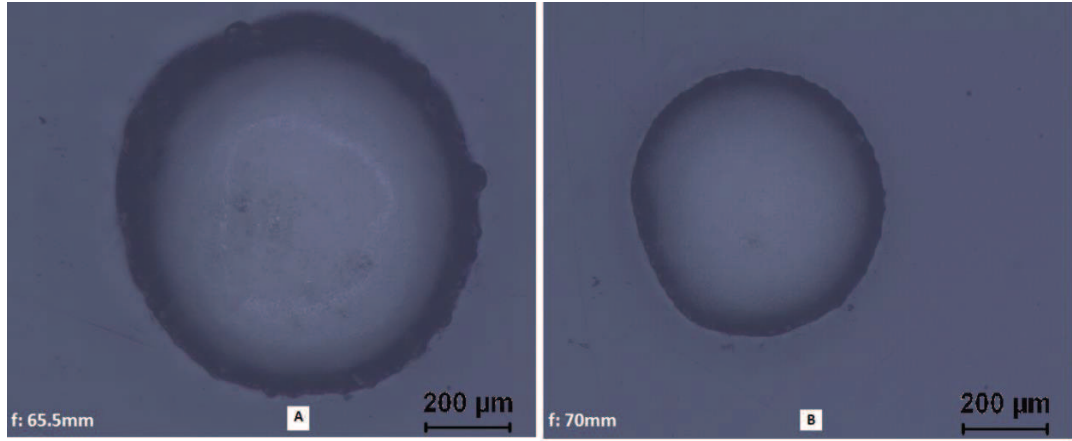
Su jeti destekli lazer sisteminin çalışma testi için siyah bir PMMA(Polimetil metakrilat) malzeme üzerine farklı odak mesafelerinden lazer atışları yapılmıştır. Lazer ışını malzemeye 500 milisaniye süre ile tesir ettirilmiştir. Farklı mesafelerden yapılan bu atışların malzeme yüzeyinde oluşturduğu izlerin çapları, su jeti ile güdümlenmeyen kuru lazer atışları ile mukayese edilmiştir. Şekil 5.7'de lazer atışlarının yapıldığı farklı odak mesafeleri şematik olarak gösterilmiştir.



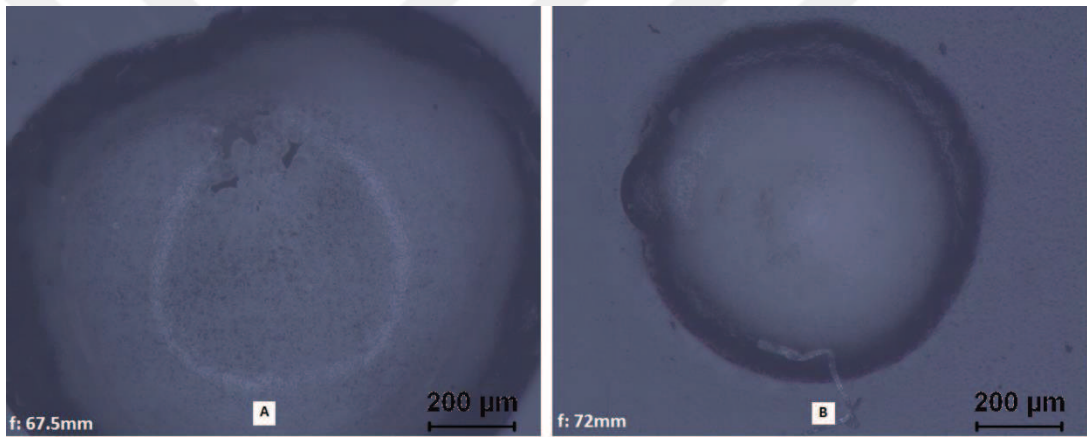
Şekil 5.7. A) Su jeti destekli lazer ile yapılan atışların odak mesafeleri, B) Geleneksel kuru lazer yöntemiyle yapılan atışların odak mesafeleri



Şekil 5.8. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f): 63,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 68 mm



Şekil 5.9. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f): 65,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 70 mm



Şekil 5.10. A) Geleneksel kuru lazer atışı, odak mesafesi (f): 67,5 mm B) Su jeti destekli lazer atışı, odak mesafesi (f): 72 mm

Geleneksel kuru lazer yöntemi ve su jeti destekli lazer yöntemi ile farklı odak mesafelerden yapılan atışların malzeme yüzeyinde bıraktığı izler incelenmiştir. Atışlar her iki yöntemde de odak mesafesi 2 mm arttırılarak üç farklı odak mesafesinden yapılmıştır. Odaklama merceği olarak 63,5 mm odak mesafeli mercek kullanıldığı için geleneksel lazerde atışlar da bu mesafeden başlamıştır. Su jeti destekli lazer yönteminde, lazer ışını küçük çaplı deliğe odaklandığı için odak mesafesi 68 mm'den başlayarak arttırılmıştır. Şekil 5.7'de odak mesafeleri şematik olarak verilmiştir.

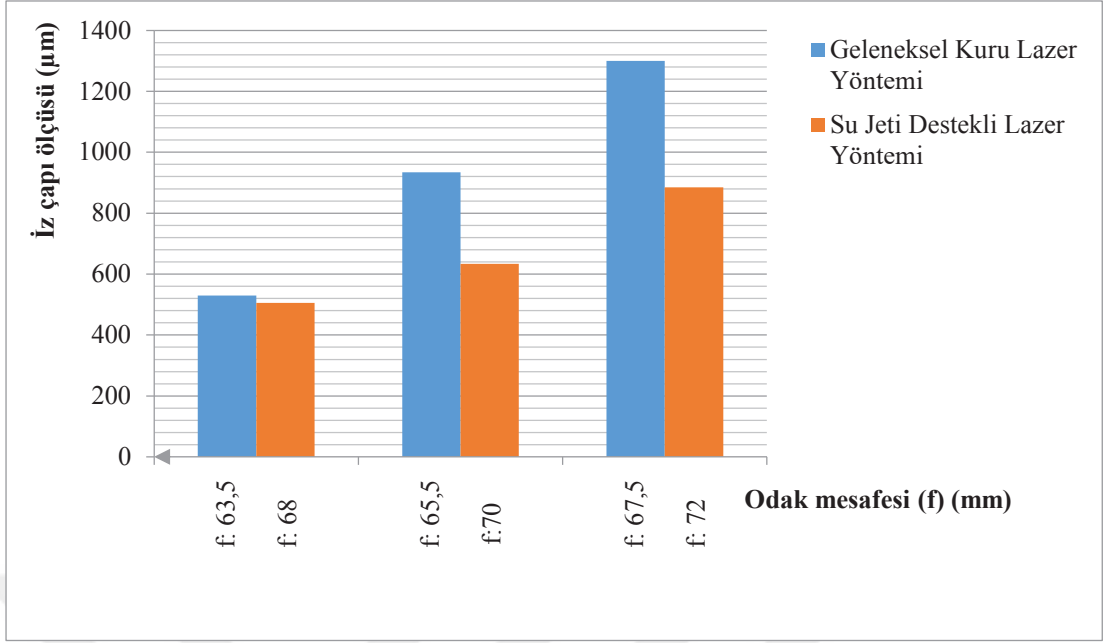
Malzeme yüzeyindeki atış izleri incelendiğinde, geleneksel yöntem ile yapılan atışlarda odak mesafesi 63,5 mm'den 65,5 mm değerine arttırıldığında, iz çapının %76 oranında büyüdüğü görülmüştür. Su jeti destekli lazer ile odak mesafesi 68 mm'den 70 mm'ye arttırıldığında ise malzeme yüzeyindeki iz çapında % 25 oranında bir artış meydana geldiği görülmüştür. Yani odak mesafesinin 2 mm'lik artışında geleneksel kuru lazer iz çapı %76 oranında büyürken, su jeti destekli lazer iz çapında %25 oranında bir büyüme meydana gelmiştir. Geleneksel kuru lazer ile yapılan atış iz çapındaki büyüme oranı, odak mesafesi 65,5 mm'den 67,5 mm'ye arttırıldığında %39 değerindedir. Su jeti destekli lazer ile odak mesafesinin 70 mm'den 72 mm'ye arttırılmasına karşılık gelen iz çapındaki büyüme oranı %28 değerindedir.

Tablo 5.1'de iki yöntem için de farklı odak mesafelerindeki izlerin çap ölçüleri sayısal olarak ifade edilmiştir. Her iki yöntemde de aynı odak mesafelerinde oluşan atış izlerinin ölçüleri kıyaslanarak iyileştirme oranları belirlenmiştir. İyileşme oranları, odak mesafesi değişimine bağlı iz çapı büyümesinin, geleneksel yönteme göre azalma miktarını ifade etmektedir.

Tablo 5.1. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz çapı değerleri

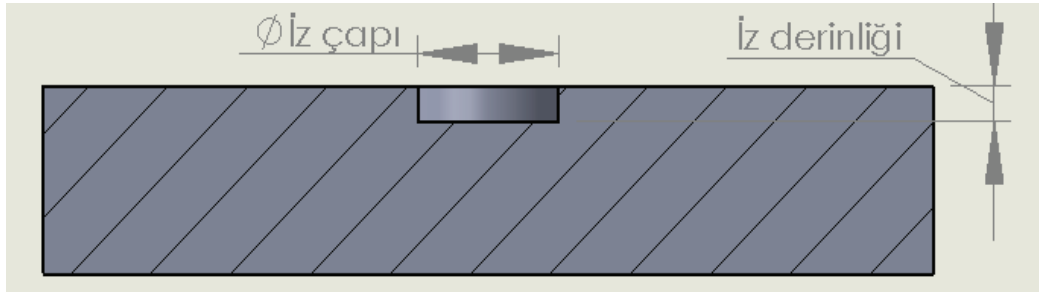
Geleneksel kuru lazer yöntemi	Odak mesafesi (mm)	İz çapı (μm)	İz çapında meydana gelen iyileşme (azalma) oranı (%)	İz çapı (μm)	Odak mesafesi (mm)	Su jeti destekli lazer yöntemi
	63,5	530	5	505	68	
	65,5	934	33	634	70	
	67,5	1300	32	885	72	

Odak mesafesindeki değişime bağlı odak nokta çapının büyümesi, geleneksel kuru lazer yönteminde, su jeti destekli lazer yöntemine göre daha fazladır. Su jeti destekli lazerde iz çapının büyümesinin sebebi su jetinin belirli mesafeden itibaren pulvarize olması ve stabil akış özelliğini kaybetmesidir. Daha yüksek basınçlı bir pompa kullanılarak su jetinin stabil akışı daha uzun mesafe boyunca korunabilir.



Şekil 5.11. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz çapı değerlerinin grafiksel gösterimi

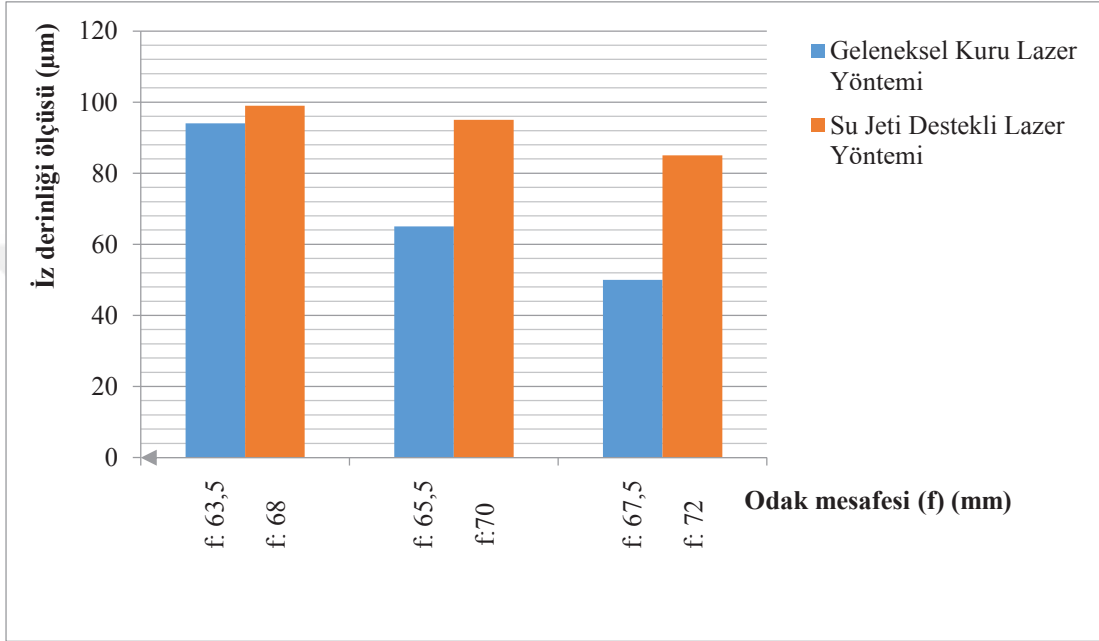
Odak mesafesinin değiştirilmesi lazer ışınının malzeme yüzeyine etkidiği noktadaki güç yoğunluğunu da değiştirmiştir. Işın güç yoğunluğundaki değişim, iz derinliklerinin her mesafede farklı oluşmasına sebep olmuştur. Farklı yöntemlerle, farklı odak mesafelerinden yapılan atışların malzeme yüzeyinde oluşturdukları izlerin derinlikleri ölçülmüştür. Geleneksel kuru lazer yöntemi ve su jeti destekli lazer ile yapılan atışlarının iz derinlik değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir. İz derinlikleri tablosundaki iyileştirme oranı, artan odak mesafelerinde iz derinliği azalmasının geleneksel yöntemdekine göre indirgenme oranını ifade etmektedir.



Şekil 5.12. Lazer iz derinliği

Tablo 5.2. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz derinliği değerleri

Geleneksel kuru lazer yöntemi	Odak mesafesi (mm)	İz derinliği (μm)	İz derinliğinde meydana gelen iyileşme (artış) oranı (%)	İz derinliği (μm)	Odak mesafesi (mm)	Su jeti destekli lazer yöntemi
	63,5	94	5	99	68	
	65,5	65	46	95	70	
	67,5	50	70	85	72	

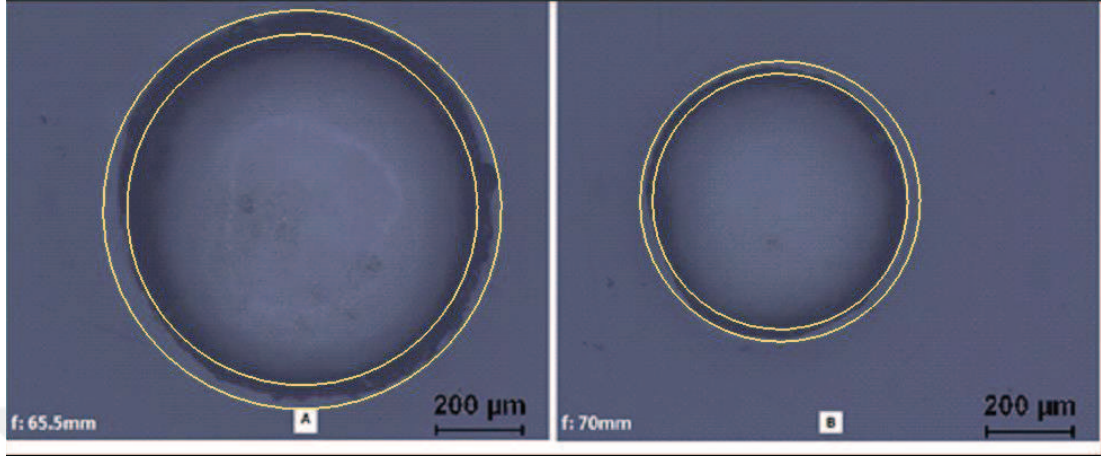


Şekil 5.13. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz derinliği değerlerinin grafiksel gösterimi

Geleneksel kuru lazerde iz derinliği, odak mesafesi 63,5 mm'den 65,5 mm'ye çıkarıldığında %30 oranında, 65,5 mm'den 67,5 mm'ye çıkarıldığında ise %23 oranında azaldığı görülmüştür. Su jeti destekli lazerde ise odak mesafesi 68 mm'den 70 mm'ye arttırıldığında iz derinliğinde %5,5 oranda azalma, 70 mm'den 72 mm'ye arttırıldığında %13 oranında bir azalma gözlenmiştir. Su jeti destekli lazerde, odak mesafesinin artışına karşılık gelen iz derinliğindeki azalma geleneksel yönteme göre oldukça azdır.

İz formları incelendiğinde; geleneksel kuru lazerde odak mesafesindeki artışa bağlı olarak iz, çember formunu gittikçe kaybetmiş ve kenarlarda girinti ve çıkıntılar meydana gelmiştir. Su jeti destekli lazer incelendiğinde ise odak mesafesindeki artışa bağlı olarak çember formunda çok daha az bir değişim gözlenmiştir. Bunun sebebi,

bu yöntemde lazer ışının malzeme üzerine daire kesitli bir su jeti içerisinde taşınmasıdır.

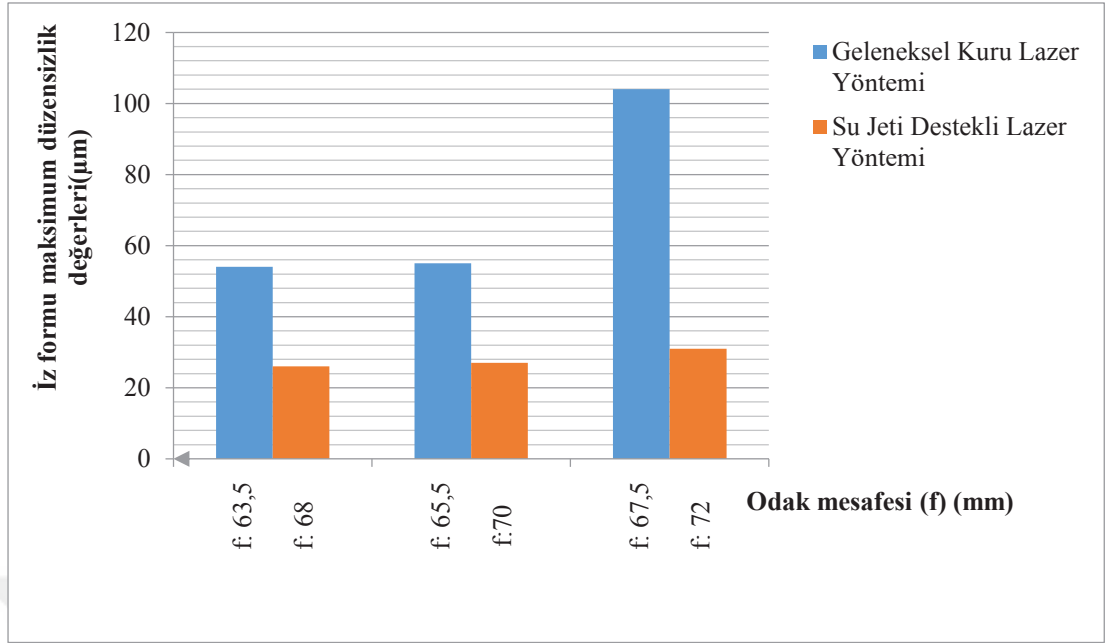


Şekil 5.14. A) Geleneksel kuru lazer yöntemi iz formu incelemesi, B) Su jeti destekli lazer yöntemi iz formu incelemesi

Şekil 5.14’te markalama izlerinin kenar düzensizlikleri gösterilmiştir. Tablo 5.3’te geleneksel kuru lazer ve su jeti destekli lazer yöntemi ile farklı odak mesafesinden yapılan atış izlerinin kenar düzensizliklerine ait sayısal değerler verilmiştir.

Tablo 3.3. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz formundaki maksimum düzensizlik değerleri

Geleneksel kuru lazer yöntemi	Odak mesafesi (mm)	İz kenarındaki maksimum düzensizlik (μm)	İz formundaki meydana gelen iyileşme oranı (%)	İz kenarındaki maksimum düzensizlik (μm)	Odak mesafesi (mm)	Su jeti destekli lazer yöntemi
	63,5	54	52	26	68	
	65,5	55	51	27	70	
	67,5	104	70	31	72	



Şekil 5.15. Geleneksel ve su jeti destekli yöntem için farklı odak mesafelerine karşılık gelen iz formundaki maksimum düzensizlik değerlerinin grafiksel gösterimi

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kesit kalınlığı bölgesel olarak değişen malzemelerin lazer ile kesilmesi işleminde sorun teşkil eden değişken odak mesafesi problemi ele alınmıştır. Kesit kalınlığı bölgesel olarak değişiklik gösteren malzemelerin kesiminde, lazer ışın çapının odak noktasından sonra büyüme göstermesi, malzemenin her bölgesinde ışın yoğunluğunun eşit şekilde oluşturulamamasına sebep olmaktadır. Bu amaçla 200 µm çapında ve 10 bar basınçlı su jeti içerisinden lazer ışını geçiren sistem donanımı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Su jeti destekli yöntem ve geleneksel kuru lazer yöntemi ile PMMA malzeme yüzeyine farklı odak mesafelerinden belirli bir süre ile lazer tesir ettirilmiş ve oluşturulan izlerin çap ve derinlikleri ölçülmüştür.

1. Yapılan ölçümler sonucunda, odak noktasından sonra 4 mm'lik mesafe boyunca markalama iz çapında %5-%33 oranında bir küçülme olduğu belirlenmiştir.
2. Odak noktasından sonra iz çapı artışı, ışın güç yoğunluğunu düşürmekte ve bununla birlikte odak mesafesi arttırıldıkça atış izlerinin derinlikleri azalmaktadır. Farklı odak mesafelerinden yapılan atışların iz derinlikleri ölçülüp 4 mm'lik bir mesafe boyunca iz derinliğinde %5-%70 oranında artış sağlanmıştır.
3. Su jeti destekli lazer atışıyla elde edilen izlerin daha düzgün bir dairesel forma sahip olduğu gözlenmiştir. İzlerin dairesellik formunda %51-%72 oranında bir iyileştirme olduğu belirlenmiştir.

Yöntemin daha iyi uygulanabilmesi için şunlar önerilebilir;

1. Daha küçük çaplarda nozul deliği açılması durumunda, malzemeye uygulanan ışın yoğunluğu artırılabilir.

2. Su pompası basıncının artırılması, suyun daha uzun mesafelere dağılmadan ulaştırılabilmesine ve bununla birlikte ışının da bu mesafelere saçılmadan gönderilmesine imkan verecektir.
3. Şebeke suyunda bulunabilecek gözle görülmeyen mikro parçacıklar lazer ışınının gücünü azaltabilir. Sistemde saf su (damıtılmış/deiyonize) kullanılması bu tür kayıpları önleyebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Karaaslan, A. Lazer ile malzeme işlemleri, Literatür Yayınları, 1-218, 2009.
- [2] Billings, C. Tabak, J. Lazerler İşlenmiş Işığın Teknolojisi ve Kullanımı, Tübitak Popüler Bilim Kitapları, 57-58, 2011.
- [3] <http://genelbilgecom.tumblr.com/post/62703371580/new-post-has-been-published-on-genelbilgecom>, Erişim Tarihi: 21.10.2014.
- [4] www.mellesgriot.com, Erişim Tarihi: 10.11.2014.
- [5] Mungan, M. C. Lazer ile kesme ve endüstriyel uygulamaları. Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [6] Smith, W. V. Laser Applications. Artech House Inc, USA, 1- 3, 1970.
- [7] www.cntsup.com, Erişim Tarihi: 12.11.2014.
- [8] Tanrıverdi, M. A. Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 1995.
- [9] Wandera, C. Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminum. Lappeenranta University of Technology, Department of Metal Technology, Doktora Tezi, 2010.
- [10] Çelik, S. Lazerler, tıpta ve özellikle göz tedavisindeki uygulamaları. Proje-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, 1998.
- [11] Süle, P. Düşük güçlü fiber lazer diyotlu kesme sistemlerinde ışın kalite faktörünün iyileştirilmesi çalışması. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2013.

- [12] Karaören, K. Lazer İle Kesim Parametrelerinin Tespiti. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1999.
- [13] http://www.lasertech.8m.com/3_1_1.htm, Erişim Tarihi: 17.10.2014.
- [14] Özden, H., Sanayide Kullanılan Yüksek Güçlü Lazer Makineleri Ve Lazer İmalat Yöntemleri, <http://dr-huso.com/makale/makale95.htm>, Erişim Tarihi: 11.12.2015.
- [15] Dubey, A., Yadava, V., Laser beam machining-A review, *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48(6): 609–628, 2008.
- [16] Yilbas, B. S., Effect of process parameters of the kerf width during the laser cutting process, in: *Proceedings of the first Mech E. Part B, J. Eng. Manuf.*, 215(10): 1357-1365, 2001.
- [17] Rajaran, N., Ahmad, J., Cheraghi S. H., CO₂ laser cut quality of 4130 steel, *Int. J. Machine Tools Manuf.*, 43(4): 351-358, 2003.
- [18] Steen, W. M. *Laser Material Processing*, Springer, 11-51, 1991.
- [19] Powell, J. *CO₂ Laser Cutting*, Springer Verlag London, 1-184, 1998.
- [20] <http://www.trumpf-laser.com/>, Erişim Tarihi: 12.02.2015.
- [21] <http://dograr.com/alt/lazer.htm>, Erişim Tarihi: 12.11.2014.
- [22] Hügel, H., New solid-state lasers and their application potentials, *Optics and Lasers in Engineering*, 34(6): 213-229, 2000.
- [23] <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/63888/isbn%209789522149749.pdf>, Erişim Tarihi: 10.16.2015.
- [24] Yilbas, B. S., Davies R., Yilbas, Z., Study into penetration speed during CO₂ laser cutting of stainless steel, *Optics and Lasers in Engineering*, 17(2): 69-82, 1992.
- [25] [http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl\[1\].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf](http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/Facts%20about%20Laser%20Cutting%20engl[1].%20Drucklayout%2023.06.03.pdf), Erişim Tarihi: 10.11.2015
- [26] John, C. I. *Laser Processing of Engineering materials*, Butterworth-Heinemann, 347-365, 2005.
- [27] http://info.tuwien.ac.at/iflt/safety/misc/ba_3_1.htm, Erişim Tarihi: 29.09.2005.

- [28] Natajaran, R. An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process. Iowa State University, Department of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, 1990.
- [29] Wandera, C. Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam. Lappeenranta University of Technology, Department of Metal Technology, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [30] Anders, I. On the physics and chemical thermodynamics of laser cutting. Lulea University of Technology, Department of Engineering Sciences and Mathematics, Doktora Tezi, 1993.
- [31] Gabzdyl, J. T. Effects of gases on laser cutting of stainless steels. In Laser Materials Processing: Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO '96 held in Detroit, Michigan, USA, 39-44, 1996.
- [32] Petring, D., Laser Cutting. İçinde: LIA Handbook of Laser Materials Processing. 1. Baskı, Laser Institute of America, USA, 425-433, 2001.
- [33] Fieret, J., Terry, M. J., Ward, B. A., Overview of flow dynamics in gas assisted laser cutting. Fourth International Symposium on optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering, 818, 1987.
- [34] Ketting, H., Olsen, F. O. High pressure off-axis laser cutting of stainless steel and aluminium. Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing (Science and Applications), Japonya, 607-612, 1992.
- [35] <http://www.solitaryroad.com/>, Erişim Tarihi: 16.02.2015.
- [36] <http://www.rp-photonics.com/mirrors.html>, Erişim Tarihi: 20.02.2015.
- [37] Berkmanns, J., Faerber, M., Laser Cutting, http://www.laserdeal.com/techInfoFiles/_FactsAbout_LasertBasics..pdf, Erişim Tarihi: 09.07.2015.
- [38] Zuccher, S. Refraction of light, <http://profs.sci.univr.it/~zuccher/downloads/refraction.pdf>, Erişim Tarihi: 10.02.2015.
- [39] http://tr.wikipedia.org/wiki/Snell_yasası, Erişim Tarihi: 28.12.2014.
- [40] Gündem, E., Kayman, K., Şahin, K., 10.Sınıf Fizik, Palme Yayıncılık, 138-141, 2014.
- [41] Peter, H. J., PhD, C. E. The water jet laser: for cutting single crystal diamond, CVD diamond and other ultra-hard materials. 6th ZISC Conference, Switzerland, 1-2, 2013.

- [42] Pauchard, A., "Precise thin metal cutting using the Laser MicroJet", Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik., Switzerland, 2-3, 2009.
- [43] Perrottet, D., Amorosi, S., Richerzhagen, B. "Dry" laser against "wet" laser - who will win? Proceedings of the Third International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, Germany, 2-3, 2005.
- [44] Kozuki, Y., Perrottet, D., Durrant, P., Richerzhagen, B. Gentle dicing of thin semiconductor materials by water-jet-guided laser. Proceedings of the 4th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Switzerland, 1-2, 2006.
- [45] <http://www.sumakpompa.com/index.php/tr/preferikal-pompalarin-kullanma-kilavuzu>, Erişim Tarihi: 01.03.2015.
- [46] Wagner, F., Sibailly, O., Vago, N., Romanowicz, R., Richerzhagen, B. The Laser Microjet Technology – 10 Years of Development, ICALEO 2003, USA, 13-16, 2003.
- [47] Vago, N., Spiegel, A., Couty, P., Wagner, F. R., Richerzhagen, B. New technique for high-speed microjet breakup analysis. Experiments in Fluids, 35(4): 303-309, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Ürgüplü, 20.09.1991 yılında Bursa’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa’da tamamladı. 2013 yılında Gazi Üniversitesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans eğitimi ile birlikte 2013-2014 öğrenim yılında Bursa’da İlhan Parseker Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi’nde makine öğretmenliği yaptı. 2014 yılından beri Berisa Lazer San. Ltd. Şti.’de proje mühendisi olarak çalışmaktadır.