

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON-FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER VE
POLİKARBONAT MALZEMELERİN LAZERLE DELME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Fizikçi Levent CANDAN

Anabilim Dalı: Fizik

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Timur CANEL

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KARBON-FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER VE
POLİKARBONAT MALZEMELERİN LAZERLE DELME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizikçi Levent CANDAN

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 26 Mayıs 2008
Tezin Savunulduğu Tarih: 03 Temmuz 2008**

**Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr. Timur CANEL**

(.....)

**Üye
Doç.Dr. Kadir ESMER**

(.....)

**Üye
Yrd.Doç.Dr. Hilal GÖKTAŞ**

(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamın hazırlanmasında büyük pay sahibi olan, sabır ve titizlikle verdiği tüm emeklerle, geleceğe yönelik kazandırdığı bilimsel bakış açısından dolayı sayın hocam Timur CANEL' e ve çalışma grubuna alarak sağladığı tüm imkânlar ve bilimsel çalışmaları ışığında yönlendirmeleri için sayın hocam Arif DEMİR' e teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmam sırasında yardımlarını esirgemeyen Kocaeli Üniversitesi öğretim üyelerinden hocalarım sayın Elif KAÇAR' a, sayın Tamer SINMAZÇELİK' e, malzemelerin optik görüntülerinin alındığı mikroskobu kullanıma sunan Biyoloji Bölüm Başkanlığı' na ve değerli öğretim elemanlarına ve LATARUM' daki çalışma arkadaşlarım Erhan AKMAN, Belgin GENÇ, Pınar DEMİR' e katkılarından, Mesure MUTLU ve Çağrı Kaan AKKAN' a desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans çalışmalarım süresince bana olan güvenlerinden ve gösterdikleri sabırdan dolayı, aileme ve yakınlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. LAZER VE ÇALIŞMA İLKELERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Lazer	3
2.3. Lazerin Tarihçesi	4
2.4. Lazerin Fiziksel Temeli	6
2.4.1. Einstein katsayıları	6
2.4.1.1. Kendiliğinden geçiş katsayısı	7
2.4.1.2. Soğurma ve uyarılmış yayılma katsayıları	9
2.4.2. Lazerin çalışma ilkeleri	11
2.4.2.1. Lazer üretmek için gerekli koşullar	11
2.4.2.2. İki seviyeli sistemlerde sayı yoğunluğu tersinimi	16
2.4.2.3. Üç ve dört seviyeli sistemlerde sayı yoğunluğu tersinimi	17
2.4.2.4. Tipik bir katıhal lazerin çalışması	19
2.4.2.5. Lazer pompalama yöntemleri	21
2.5. Lazer Işınının Özellikleri ve Uygulama Alanları	21
2.5.1. Lazer ışınının özellikleri	21
2.5.1.1. Tek renklilik	21
2.5.1.2. Yönlendirilebilirlik	22
2.5.1.3. Şiddet	22
2.5.2. Lazerin uygulama alanları	23
BÖLÜM 3. LAZERLE MALZEME İŞLEME (KESME, KAYNAK, DELME)	25
3.1. Giriş	25
3.2. Malzeme İşleme Sırasında Gerçekleşen Fiziksel Olaylar	26
3.2.1. Maddenin Optik Özellikleri	27
3.2.1. Maddenin Isısal Özellikleri	31
3.3. Lazer İle Malzeme Delme İşlemi	36
3.3.1. Enerjinin etkisi	39
3.3.2. Frekansın etkisi	40
3.3.3. Atım sayısının etkisi	41
3.3.4. Dalgaboyunun etkisi	42
3.4. Polimerler	43
3.4.1. Polimerlerin özellikleri	44
3.4.1.1. Molekül ağırlıkları	44
3.4.1.2. Polimerlerin sınıflandırılması	45

BÖLÜM 4. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN	
Nd:YAG LAZER İLE DELİNMESİ	47
4.1. Polimer Kompozitlerin Delinmesinde Kullanılan Deneysel Düzenek.....	47
4.2. Polimer Kompozit Malzemenin ve Deney Sisteminin İşlem İçin Hazırlanması	48
4.3. Polimer Kompozit Malzemenin Nd:YAG Lazer İle Delinmesi	50
BÖLÜM 5. Nd:YAG LAZER KULLANARAK PC POLİMER DELME	60
5.1. Giriş.....	60
5.2. PC Polimer Malzemenin Delinmesinde Kullanılan Nd: YAG Lazer ve Deneysel Düzenek	60
5.3. Polimerlerin Lazerle İşlenmesi	63
5.4. Deneysel Çalışma.....	65
5.4.1. Atım sayısının etkisi.....	66
5.4.2. Enerjinin etkisi	69
5.4.3. Frekansın etkisi	71
5.4.4. Vakumun etkisi	73
BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	77
KAYNAKLAR	81
KİŞİSEL YAYINLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ	86

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Kendiliğinden geçiş	7
Şekil 2.2: İki seviyeli bir durumda kendiliğinden geçiş.....	8
Şekil 2.3: Uyarılmış üst enerji seviyesinin yoğunluğunun zamana göre değişimi	9
Şekil 2.4: Olası geçişlerden uyarılmış yayılma ve uyarılmış soğurma	9
Şekil 2.5: Bir tabakadan ışığın soğurularak geçişi	12
Şekil 2.6: Şiddetin kalınlığa göre değişimi	12
Şekil 2.7: Tipik bir katıhal lazeri enerji seviyeleri.....	17
Şekil 2.8: Lazer ışını oluşumu.....	19
Şekil 2.9: Lazer demetinin uyumluluğu	21
Şekil 2.10: Lazer demetinin yönlendirilebilirliği	22
Şekil 2.11: Lazerlerin uygulama alanları	23
Şekil 3.1: Lazerlerin kullanım alanlarına göre dağılımı.....	25
Şekil 3.2: Sıcaklık – Zaman değişim noktaları	33
Şekil 3.3: Yüksek şiddetli lazer atımı malzeme yüzeyine düşürüldüğünde gerçekleşen (a) erime, (b) buharlaşma ve (c) plazma oluşma fiziksel süreçlerinin şematik gösterimi	34
Şekil 3.4: Lazerle delme teknikleri: (a) tek atımlı, (b) keserek, (c) çok atımlı	37
Şekil 3.5: PC polimer malzeme de lazerle delme işleminde dışarı atılan kürecikler	38
Şekil 3.6: Seramik malzeme delme işlemi. Atım süresi 2 ms.....	39
Şekil 3.7: Atımlı yakut lazeri kullanılarak yapılan çalışmada farklı enerjilerde Alüminyum tabakada delik oluşumu	40
Şekil 3.8: Frekansın delik çapına etkisi.....	41
Şekil 3.9: Atım sayısının delik çapına etkisi.....	41
Şekil 3.10: Lazerle delme işlemi süreçleri	43
Şekil 4.1: Deliğin, Isıdan Etkilenen Bölgenin (HAZ) ve saçılma bölgesinin boyutları. Deliğin çapı “A” ile gösterilmiştir. HAZ’ ın şekli eliptik’tir. Maksimum HAZ elipsin ana eksenidir ve “B1” ile gösterilmiştir. Minimum HAZ elipsin ikincil eksenidir ve “B2” ile gösterilmiştir. Saçılma bölgesinin şekli de eliptiktir. “C1” elipsin ana eksenini “C2” ise ikincil eksenini göstermektedir.....	51
Şekil 4.2: HAZ ve Saçılma Bölgesinin uygulanan lazer enerjisi ile değişimi	52
Şekil 4.3: Lazer atım enerjisinin delik, HAZ ve saçılma bölgelerinin boyutlarına olan etkisi	53
Şekil 4.4: Çoklu atım etkisi.....	53
Şekil 4.5: Tablo 4.2’ deki verilerin karşılaştırılması.....	54
Şekil 4.6: Çoklu atım etkisi.....	54
Şekil 4.7: Tablo 4.3’ deki verilerin karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.8: Çoklu atım etkisi.....	55
Şekil 4.9: Tablo 4.4’ deki verilerin karşılaştırılması.....	56
Şekil 4.10: Atım enerji oranlarının değişimin etkisi	57
Şekil 4.11: Tablo 4.5’ deki verilerin karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.12: Atım enerji oranlarının değişimin etkisi	58
Şekil 4.13: Tablo 6’ daki verilerin karşılaştırılması.....	59

Şekil 5.1: Vakum Ortamının dış ve iç görünümü	61
Şekil 5.2: Atmosfer Basıncılı ortam görünümü	61
Şekil 5.3: Lazer mod görüntüsü: (a) Lazer demetinin TEM ₁₀ modunun demet şekil belirleyici ile elde edilen görüntüsü (b) Bir TEM ₁₀ modu görüntüsü.....	62
Şekil 5.4: İris, objektif ve hedef malzemeden oluşan optik sistem.....	62
Şekil 5.5: Atım sayısının derinliğe etkisi. Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ	66
Şekil 5.6: Atım sayısının delik çapına etkisi. Dalga boyu: 532 nm, Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ	67
Şekil 5.7: Atım sayısının derinlik/genişlik oranı göre değişimi. Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ	67
Şekil 5.8: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için atım sayısı değişimleri. (a) ve (b) Atım sayısı: 80. (c) ve (ç) Atım sayısı: 240. (d) ve (e) Atım sayısı: 400... ..	68
Şekil 5.9: Enerjinin derinliğe etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160.....	69
Şekil 5.10: Enerjinin delik çapına etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160.....	70
Şekil 5.11: Enerji değişiminin derinlik /genişlik oranına etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160	70
Şekil 5.12: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için enerji değişimleri. (a) Enerji: 0,0628 mJ. (b) Enerji: 0,0565 mJ. (c) Enerji: 0,2449 mJ. (ç) Enerji: 0,1623 mJ	71
Şekil 5.13: Frekansın derinliğe etkisi. Enerji: 0,07329 mJ, Atım sayısı: 160	72
Şekil 5.14: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için Enerji değişimleri. (a) ve (b) Frekans: 1 Hz. (c) ve (ç) Frekans: 5 Hz. (d) ve (e) Frekans: 10 Hz.....	73
Şekil 5.15: Basınç değişiminin derinliğe etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz	74
Şekil 5.16: Basınç değişiminin delik çapına etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz. 74	
Şekil 5.17: Basınç değişiminin derinlik/genişlik oranına etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz	74
Şekil 5.18: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için basınç değişimleri. (a), (b) ve (c) Basınç: $3 \cdot 10^2$ Torr. (ç), (d) ve (e) Basınç: $1,3 \cdot 10^1$ Torr. (f), (g) ve (h) Basınç: $1,5 \cdot 10^{-5}$ Torr	75
Şekil 5.19: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için basınç değişimleri. (a), (b) ve (c) Basınç: Atmosfer Basıncı. (ç), (d) ve (e) Basınç: $1,5 \cdot 10^{-5}$ Torr....	76

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1: Kazanç ortamına ve dalga boyuna göre değişen lazer çeşitleri	12
Tablo 3.1: Lazerle delik delme yönteminin karşılaştırılması	36
Tablo 4.1: Uygulanan lazer enerjisi ve delik çapları	52
Tablo 4.2: 0.31 J enerjili tek atım etkisi ile 3 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark	54
Tablo 4.3: 0.7 J enerjili tek atım etkisi ile 7 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark	55
Tablo 4.4: 3.56 J enerjili tek atım etkisi ile 35 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark	56
Tablo 4.5: Atım enerji oranlarının değişiminin etkisi	57
Tablo 4.6: Atım enerji oranlarının değişiminin etkisi	58
Tablo 4.7: Çoklu ve tekli atım değişimlerinin karşılaştırılması	59
Tablo 4.8: Değişik enerji oranlarına göre değişimlerin karşılaştırılması	59
Tablo 5.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM)'nde bulunan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri	60
Tablo 5.2: PC polimer malzemenin tipik fiziksel özellikleri	65
Tablo 5.3: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda atım sayısının değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler	66
Tablo 5.4: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda enerji değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler	69
Tablo 5.5: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda frekans değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler	72
Tablo 5.6: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalga boyunda basınç değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler	73

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

$\Delta E_{\bar{u}a}$	: İki seviye arasındaki enerji farkı
$E_{\bar{u}}$	: Üst enerji seviyesi enerjisi
E_a	: Alt enerji seviyesi enerjisi
$N_{\bar{u}}$	: Üst enerji seviyesi elektron yoğunluğu
N_a	: Alt enerji seviyesi elektron yoğunluğu
$N_{\bar{u}}^0$	: Başlangıç durumdaki üst enerji seviyesi elektron yoğunluğu
$A_{\bar{u}a}$	: Kendiliğinden ışıma olasılığı
$B_{\bar{u}a}$	: Uyarılmış ışıma geçiş olasılığı
$B_{a\bar{u}}$	: Uyarılmış soğurma olasılığı
t	: Zaman
τ	: Atomun uyarılma durumunda kalma süresi (yarı ömür)
h	: Planck sabiti
ν	: Işıma frekansı
$\Delta\nu$	: Frekans aralığı
$\bar{u}$	: Üst enerji seviyesi
a	: Alt enerji seviyesi
I	: Işıma şiddeti
I_0	: Başlangıç ışıma şiddeti
I_z	: Kalınlığı z olan bir ortamdan geçen ışıma şiddeti
z	: Ortam uzunluğu
$g_{\bar{u}}$	: Üst enerji seviyesinin istatistiksel ağırlığı
g_a	: Alt enerji seviyesinin istatistiksel ağırlığı
k_B	: Boltzmann sabiti
T	: Sıcaklık
c	: Işık hızı
$u(\nu)$	: Karacisim ışıma enerji yoğunluğu
α	: Soğurma katsayısı
$\mathcal{G}$	: Hız
$\omega(\nu)$	: Hacimsel spektrum yoğunluğu
$g(\nu)$	: Kazanç katsayısı
$\Delta\phi$	: Faz farkı
λ	: Dalgaboyu
L	: Rezonatör aynaları arasındaki mesafe
θ	: Sapma açısı
$\theta_{\min}$	: Minimum sapma açısı
R_A	: Ayna çapı

P	: Güç
P_t	: Lazer tepe gücü
$\vec{P}$	: Kutuplanma vektörü
$\vec{E}$	: Elektrik alan vektörü
$\varepsilon(\omega)$	: Karmaşık dielektrik fonksiyonu
n	: Kırıcılık indisi
k	: Sönüm katsayısı
$R_{\perp}$	: Malzemenin yansıtıcılığı
ω_p	: Plazma salınım frekansı
ω_0	: Rezonans frekansı
Γ_k	: Sönüm sabiti
δ	: Optik derinlik
κ	: Isısal iletkenlik
ρ	: Malzeme yoğunluğu
F	: Soğurulan ışıma

KARBON-FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLER VE POLİKARBONAT MALZEMELERİN LAZERLE DELME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Levent CANDAN

Anahtar kelimeler: Lazerle malzeme işleme, sanayide Nd:YAG lazerin uygulamaları, lazer ile delme, polimerik malzemelerin işlenmesi.

Özet: Polimer malzemeler çok geniş uygulama alanlarına sahip olup, farklı yöntemlerle sentezlenerek yeni nesil malzemeler elde edilmektedir. Polimerik sentez malzemelerin kullanım alanlarına uygun işlenmesi bu tür malzemelerin yüksek kalite ve verimi için oldukça önemlidir. Bu anlamda gelişen lazer teknolojisi, polimerik malzeme işlemede kullanılabilir. Çünkü lazer yüksek işlem hızı, düşük ısısal zarar, yüksek derinlik/genişlik oranı gibi özelliklerinden dolayı kesme, kaynak ve yüzey işleme gibi alanlarda tercihen kullanılmaktadır. Lazerlerin işlem parametrelerinde (atım süresi, dalgaboyu, atım enerjisi) sağlanan esneklik bu tür malzemelerin hassas delme işlemlerinde en önemli etkenlerdendir. Seramik, silikon ve polimer katmanları gibi malzemelerin lazerle işlenmesi elektronik endüstrisinde oldukça geniş kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında bina yapımından kompakt disk (CD) yapımına kadar birçok alanda uygulama alanı bulunan polikarbonatların ve pek çok alanda kullanılan polimer kompozitlerin atımlı lazerler kullanılarak delme işlemleri yapılmış ve lazer parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

AUTOMATION of MATERIAL MACHINING by LASER and PLASMA FORMATION SYSTEMS

Levent CANDAN

Keywords: Micromachining of materials with laser, Nd:YAG laser application in industry, drilling by laser, machining of polymeric materials

Abstract: Everyday new polymers are being added to thousands of polymer produced by new polymerization technique. Polymers are necessary part of daily life practically at all area. High quality holes are important in electronic and medical industry. Lasers are preferred in drilling, cutting, welding because its high process speed, low thermal deformation, high aspect ratio. Application area of lasers are growing with laser system developed with progressive technology. Flexibility of laser parameters (pulse duration, wavelength, pulse energy) made enable to develop quality of machining. Drilling process of ceramics, silicon and polymer layers with laser are used in electronic industry. Laser can drill smaller and more precise hole than that of conventional technique.

In this thesis study, laser parameters of drilling of carbon fibre reinforced polymer composites laser and microdrilling of polycarbonate material by Nd:YAG are investigated.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Lazerlerin odaklandığı bölgede yüksek enerji yoğunluklarına ulaşabilmesi seramikten polimerlere, yüksek karbon içerikli malzemelerden alüminyum malzemelere kadar birçok farklı özellikte malzemenin işlenebilmesine olanak sağlamıştır. Artan ihtiyaçlarla birlikte her geçen gün işlenmesi gereken malzeme çeşidi ve uygulama alanlarına bağlı olarak bu işlemlerin kalitesindeki artış gerekliliği her geçen gün artmaktadır. Lazerlerin endüstriyel uygulamalara dâhil edildiği tarihten bu yana bu gerekliliği büyük ölçüde karşılamaktadırlar ve halen konu üzerinde yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu tez çalışmasında bina yapımından kompakt disk (CD) yapımına kadar birçok alanda uygulama alanı bulunan polikarbonatların ve uçak gövde yapımı gibi pek çok alanda kullanılan polimer kompozitlerin atımlı lazerler kullanılarak delme işlemleri yapılmış ve lazer parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bölüm 2’ de deneysel çalışmalarda kullanılan lazer sistemlerinin fiziksel temelleri, çalışma ilkeleri, lazer sistemlerinin tarihsel gelişimini veren kısa bir tarihsel özet ile birlikte lazer ışınmasını diğer ışık kaynaklarından ayıran özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 3’ de lazer ışığının malzeme ile etkileşimi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar, lazerler ile gerçekleştirilen delme teknikleri ve lazer parametrelerinin delme işlemi üzerindeki etkisi ve deneysel çalışmalarda hedef olarak kullanılan polimerler hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 4’ de karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin delinmesi sırasında kullanılan deneysel düzenek ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Deneyde hedef olarak kullanılan fiber katkılı polimer kompozitler hakkında detaylı bilgilere yer verilerek, malzemelerin deneysel çalışmalara hazırlanması anlatılarak, çalışmalardan elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Bölüm 5’ de birçok alanda kullanım alanı bulan polikarbonatların delme işlemi için tasarlanan deneysel düzenek, polikarbonatların özellikleri ve çalışma sırasında kullanılan atımlı Nd:YAG lazer parametrelerinin delme işlemi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

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

BÖLÜM 2. LAZER VE ÇALIŞMA İLKELERİ

2.1 Giriş

Albert Einstein tarafından 1917 yılında uyarılmış yayılmanın gerçekleşebileceğinin kuramsal olarak ispatlanması ile temelleri atılan lazer kısa zaman içinde otomotiv ve uzay sanayisinden cerrahiye, savunma sanayisinden eğlence sektörüne kadar birçok farklı alanda uygulama alanı bulmuştur. Halen devam eden çalışmalar ile lazerlerin çeşitliliği ve buna bağlı olarak uygulama alanları günden güne geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu bölümde lazer sistemlerinin tarihsel gelişimini veren kısa bir tarihsel özet ile birlikte, deneysel çalışmalarda kullanılan lazer sistemlerinin fiziksel temelleri, çalışma ilkeleri, diğer ışık kaynaklarından ayıran özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgiler verilecektir.

2.2 Lazer

Bir maddeyi karakterize eden büyüklüklerden biri soğurma katsayısıdır. Klasik lineer optiğe göre soğurma katsayısı sıfırdan büyüktür. Yani ışık, soğurma katsayısı sıfırdan büyük olan bir maddeden geçerken şiddetinde azalma olur ve soğurulma meydana gelir. Günümüz kuantum anlayışı bu alanda da kendini göstermiş ve soğurma katsayısı sıfırdan küçük olan ortamlardan ışığın geçerken güçlenebileceği ortaya atılmıştır. Araştırmalar göstermiştir ki özel hallerde gerçek ortamlarda “negatif soğurma” olarak bilinen olayı gerçekleştirmek mümkün olmuştur [1]. Oluşturulan bu özel hal (ya da sistem): Bir ortam içerisinde birbirine paralel yerleştirilmiş iki ayna ve bu aynalar arasında düzlem eksene paralel konulmuş bir özel kristal çubuk ve bu kristal çubuğu sürekli etkin tutmak için özel yerleştirilmiş optik ya da elektrik pompadan oluşmaktadır (tipik bir Nd:YAG lazer sistemi) [2, 3]. Bu sistemde, aynalar arasında ışık sürekli ileri - geri hareket ettirilerek kristal çubuğa etki eder ve kristal çubuğu oluşturan moleküllerin ya da atomların enerji seviyeleri uyarılarak daha fazla foton salınması sağlanır.

Sonuç olarak bu özel ortamda, ışık bir maddeden geçerken zayıflamaz aksine güçlenir. Işık salınımları ile güçlendirilmiş olarak elde edilen bu ışın “uyarılmış yayılma ile ışığın güçlendirilmesi [4]” olarak bilinir. Bu sistem ya da alet “Laser Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” ifadesindeki kelimelerin baş harfleri kullanılarak “LASER” diye adlandırılmıştır [2]. Dilimizde “Lazer” diye anılan bu sistem; otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisi gibi pek çok endüstride malzeme işleme süreçlerinde [5, 6], sağlık uygulamaları, iletişim ve savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [4].

2.3 Lazerin Kısa Tarihçesi

Lazer sisteminin temelleri ilk olarak 1917 yılında Albert EINSTEIN tarafından bir matematiksel ispat kullanılarak öngörülen “uyarılmış yayılma” kavramıyla atılmıştır [2, 3]. 1928 de Rudolph W. LANDENBURG, Einstein’ ın öngördüğü uyarılmış ışımanın varlığını kanıtlamış ve negatif soğurma kavramını ortaya atmıştır. 1940 da Valentin A. FABRIKANT, negatif soğurma katsayılı ortam oluşturma (diğer bir deyişle sayı yoğunluğu tersinimi olma olasılığı) kuralını açıklamıştır [1, 7, 8]. 1947 de Willis E. LAMB ve R. C. RETHERFORD, uyarılmış yayılmanın ilk gösterimini gerçekleştirmişlerdir [7, 8, 9]. 1951 de Charles H. TOWNES (Kolombiya Üniversitesi), Joseph WEBER (Maryland Üniversitesi) ve Alexander PROKHOROV - Nikolai G. BASOV (Lebedev Laboratuvarı) birbirlerinden bağımsız olarak; uyarılmış yayılmadan yararlanılarak mikrodalga ışın bölgesinde 1.25 cm dalga boyunda ışın yayan “maser” aletini geliştirmişlerdir [3, 8, 9, 10]. 1958 de Arthur L. SCHAWLOW ve Charles H. TOWNES, mazer sistemini optik frekansa genişletme fikirlerini bir yayınlı ifade etmişler ve demet büyütmek için aynalarla çevrili bir “optik yükselteç” sistemi tasarlamışlardır [3, 11]. 1960 da Theodore MAINMAN, yükselteç olarak bir Yakut (Ruby) kristali ve enerji kaynağı olarak flash lambası kullanarak ilk lazeri keşfetmiştir [2, 3]. Bu keşiften sonra günümüze kadar tasarlanan çeşitli optik yükselteçlerle elektromanyetik spektrumun birçok bölgesinde (kızılaltı, görünür vs.) farklı dalgaboylarında farklı kullanım alanları (sağlık, malzeme ve makine endüstrisi, iletişim vs.) için lazer sistemleri geliştirilmiştir (CO₂, He-Ne, Nd: YAG, Excimer vs.) ve geliştirilmeye de devam edilmektedir (Tablo 2.1).

Tablo 2.1: Kazanç ortamına ve dalga boyuna göre değişen lazer çeşitleri [12]

Kazanç Ortamı	Lazer Tipi	Dalga Boyu
UZAK KIZILALTI		
Er:Glass	Katıhal	1540 nm
YAKIN KIZILALTI		
Cr:Forsterite	Katıhal	1150-1350 nm
HeNe	Gaz	1152 nm
Argon	Gaz-İyon	1090 nm
Nd:YAP	Katıhal	1080 nm
Nd:YAG	Katıhal	1064 nm
Nd:Glass	Katıhal	1060 nm
Nd:YLF	Katıhal	1053 nm
Nd:YLF	Katıhal	1047 nm
InGaAs	Yarıiletken	980 nm
Krypton	Gaz-İyon	799.3 nm
Cr:LiSAF	Katıhal	780-1060 nm
GaAs/GaAlAs	Yarıiletken	780-905 nm
Krypton	Gaz-İyon	752.5 nm
Ti:Sapphire	Katıhal	700-1000 nm
GÖRÜNÜR BÖLGE		
Ruby	Katıhal	694 nm
Krypton	Gaz-İyon	676.4 nm
Krypton	Gaz-İyon	647.1 nm
InGaAlP	Yarıiletken	635-660 nm
HeNe	Gaz	633 nm
Ruby	Katıhal	628 nm
HeNe	Gaz	612 nm
HeNe	Gaz	594 nm
Cu	Metal buhar	578 nm
Krypton	Gaz-İyon	568.2 nm
HeNe	Gaz	543 nm
DPSS	Yarıiletken	532 nm
Krypton	Gaz-İyon	530.9 nm
Argon	Gaz-İyon	514.5 nm
Cu	Metal buhar	511 nm
Argon	Gaz-İyon	501.7 nm
Argon	Gaz-İyon	496.5 nm
Argon	Gaz-İyon	488.0 nm
Argon	Gaz-İyon	476.5 nm
Argon	Gaz-İyon	457.9 nm
HeCd	Gaz-İyon	442 nm
N ₂ ⁺	Gaz	428 nm
Krypton	Gaz-İyon	416 nm
YAKIN MOR ÖTESİ		
Argon	Gaz-İyon	364 nm (UV-A)
XeF	Gaz (excimer)	351 nm (UV-A)

Tablo 2.1: (Devamı) Kazanç ortamına ve dalga boyuna göre değişen lazer çeşitleri [12]

N ₂	Gaz	337 nm (UV-A)
XeCl	Gaz (excimer)	308 nm (UV-B)
UZAK MOR ÖTESİ		
Krypton SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	284 nm (UV-B)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	264 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	257 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	250 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	248 nm (UV-C)
KrF	Gaz (excimer)	248 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	244 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	238 nm (UV-C)
Argon SHG	Gaz-İyon/BBO kristal	229 nm (UV-C)
KrCl	Gaz (excimer)	222 nm (UV-C)
ArF	Gaz (excimer)	193 nm (UV-C)

2.4 Lazerin Fiziksel Temeli

Lazer ışınını elde etmek için öngörölmüş olan fiziksel olaylar çok önemlidir. Bu olayları sırasıyla inceleyelim.

2.4.1 Einstein katsayıları

Deneylerde ispat edilmiştir ki bir atomda elektronlar, enerjinin $E_1, E_2, E_3, \dots$ gibi kesikli değerler ile ifade edilen hallerde bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgaların atomlar tarafından soğurulması veya yayılması atomların elektronlarının bir enerji seviyesinden diğer bir enerji seviyesine geçmesi durumunda meydana gelir. İki seviyeli bir sistem için, üst enerji seviyesi E_2 , alt enerji seviyesi E_1 olmak üzere, üst seviyeden alt seviyeye elektron geçişi esnasında yayılan fotonun enerjisi değeri;

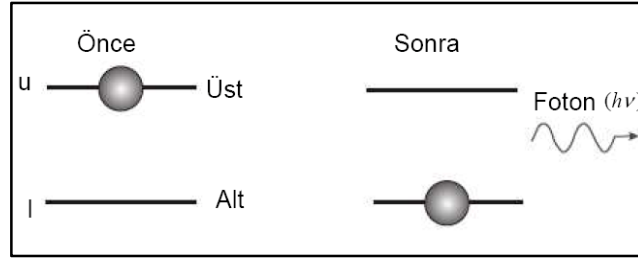
$$\Delta E_{21} = h\nu_{21} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

olarak ifade edilir. Burada h : Planck sabiti, ν_{21} : enerjisi E_2 olan seviyeden, enerjisi E_1 olan seviyeye geçiş yaparken yayılan (veya soğurulan) elektromanyetik dalganın frekansıdır. Atomların enerji seviyeleri arasında üç farklı geçiş olmaktadır. Bu geçişler optik geçişler olarak adlandırılır. Bu optik geçişler; i) kendiliğinden geçiş, ii)

soğurma ve iii) uyarılmış yayılma olup Einstein katsayıları ve Boltzmann dağılımı ile ifade edilir.

2.4.1.1 Kendiliğinden geçiş katsayısı

Uyarılmış herhangi bir atom belirli bir t anında E_2 enerji seviyesi durumunda ise, τ_2 zamanı kadar bir süreden (veya bu uyarılma ömrü süresinden) sonra kendiliğinden daha düşük enerji seviyesi olan E_1 enerji seviyesine geçiş yapar. Bu geçiş esnasında elektron $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ enerjili bir foton yayınlayacaktır.

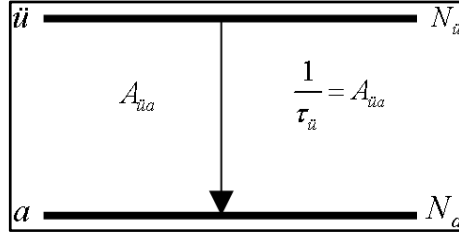


Şekil 2.1: Kendiliğinden geçiş

Atomun uyarılmış durumdan denge durumuna geçmesiyle meydana gelen bu ışımaya kendiliğinden ışıma (ya da geçiş) denir. Atomun uyarılmış durumdan düşük enerjili seviyeye kendiliğinden geçişi dışarıdan etki olmaksızın ortaya çıkan ve üst seviyede kalma süresine bağlı bir durumdur. Birim zamanda geçiş olasılığı A gibi bir nicelik ile ifade edilecek olursa, E_2 durumundan E_1 durumuna geçiş olasılığı A_{21} ile gösterilebilir ve E_2 enerji seviyesinde kalma süresi τ_2 ile ilişkisi

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_2} \quad (2.2)$$

şeklinde [1,3]. Bu katsayıya kendiliğinden ışımalı geçiş olasılığı veya sadece kendiliğinden geçiş olasılığı denir. Bu katsayıyı biraz daha genelleştirerek üst enerji seviyesinin sayı yoğunluğu ifade edilebilir.



Şekil 2. 2: İki seviyeli bir durumda kendiliğinden geçiş [1, 3, 4].

Üst enerji seviyesi $E_{\bar{u}}$, alt enerji seviyesi E_a ve $N_{\bar{u}}$, üst enerji seviyesindeki sayı yoğunluğu olmak üzere dt süresince;

$$dN_{\bar{u}} = -A_{\bar{u}a} N_{\bar{u}} dt \quad (2.3)$$

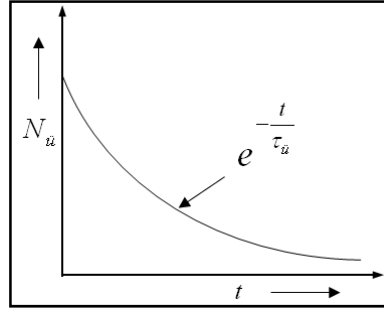
ifadesine bağlı olarak uyarılmış durumdaki atomların sayısında azalma olacaktır [1, 3]. Burada $A_{\bar{u}a}$, birim zamanda uyarılmış atomların temel hale geçiş olasılığını ifade eder. Eksi (-) işareti zamanla azalmayı ifade eder. Eşitlik (2. 3) de açıkça görülmektedir ki ışıma şiddeti uyarılmış atomların sayısının birim zamandaki azalması ile doğru orantılı olup;

$$I \sim -\frac{dN_{\bar{u}}}{dt} \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir [1]. Kendiliğinde geçiş olayında üst enerji seviyesinin sayı yoğunluğunun zamana bağlılığı Eşitlik (2. 3) çözülerek elde edilir ve

$$N_{\bar{u}} = N_{\bar{u}}^0 e^{-A_{\bar{u}a}t} \quad (2.5)$$

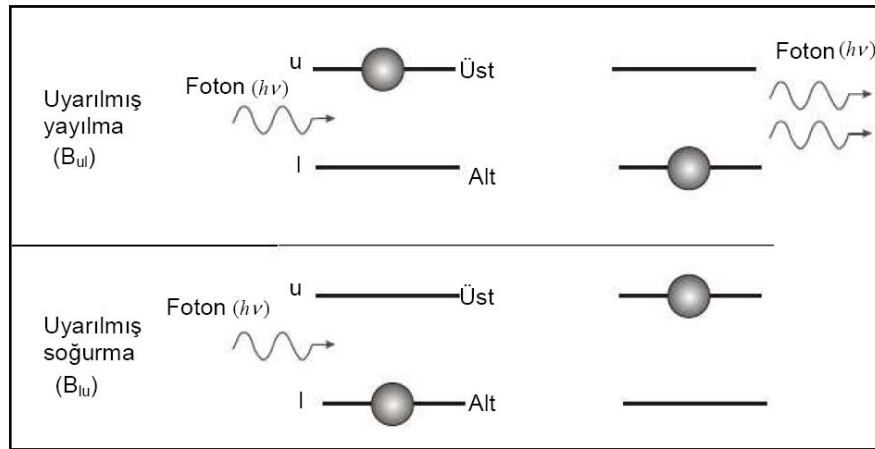
şeklindedir. Burada $N_{\bar{u}}^0$, kendiliğinden geçiş olmadan önceki üst enerji seviyesi yoğunluğudur. Şekil 2. 3' de sayı yoğunluğunun zamana göre değişimi verilmektedir.



Şekil 2.3: Uyarılmış üst enerji seviyesinin yoğunluğunun zamana göre değişimi [3]

2.4.1.2 Soğurma ve uyarılmış yayılma katsayıları

Dışarıdan gelen fotonlarla etkileşen elektronlar, iki enerji seviyesi arasındaki enerji farkına eşit miktarda enerji soğurarak E_1 enerji seviyesinden E_2 enerji seviyesine geçer. Bu olay soğurma olarak adlandırılır. Kendiliğinden geçiş olayında oluşan ışımadan farklı olarak soğurma olasılığı, bu geçişi oluşturan ışıma enerjisi yoğunluğu ile orantılı olacaktır. Einstein yalnız bu iki geçiş olasılığını dikkate alarak Planck ifadesini çıkarmaya çalışmış ancak beklediği sonucu elde edememiştir. Einstein, bu sıkıntıyı ortadan kaldırmak için lazer sistemlerinin de kuramsal temelini oluşturan fikrini açıklamıştır: düşük enerji seviyesinden uyarılma yolu ile bir üst enerji seviyesine geçiş olayının benzeri bir şekilde yine uyarılma yolu ile uyarılmış bir üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçiş olabilir. Lazer ışık kaynaklarının fiziksel temelini bu geçiş oluşturmaktadır [1]. Şekil 2. 4 ‘te bu geçişler gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Olası geçişlerden uyarılmış yayılma ve uyarılmış soğurma [3, 4].

Başka bir deyişle, bir foton bir elektronu düşük enerjili a seviyesinden yüksek enerjili bir $\bar{u}$ seviyesine uyarabiliyorsa, bir foton yüksek enerjili $\bar{u}$ seviyesindeki bir elektronu düşük enerjili a seviyesine indirmek için uyarabilir. Soğurma olayında foton enerjisi elektron tarafından soğurulur. Uyarılmış yayılma durumunda ise enerjinin korunumu gereği gelen foton ile aynı enerjide ve momentumun korunumu gereği aynı doğrultu ve fazda ortama, geçiş esnasında bir foton yayılır (Şekil 2. 4) [1, 2, 3, 4].

Isısal denge durumunda atomların uyarılmış seviyelerinin yoğunlukları arasındaki ilişki Boltzmann dağılım fonksiyonu ile

$$\frac{N_{\bar{u}}}{N_a} = \frac{g_{\bar{u}}}{g_a} e^{-(E_{\bar{u}} - E_a)/k_B T} = \frac{g_{\bar{u}}}{g_a} e^{-\Delta E_{\bar{u}a}/k_B T} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $N_{\bar{u}}$ üst uyarılmış seviyelerin sayı yoğunluğu, N_a alt seviyelerin sayı yoğunluğu, $g_{\bar{u}}$ üst enerji seviyelerinin istatistiksel ağırlığı, g_a alt enerji seviyelerinin istatistiksel ağırlığı, $\Delta E_{\bar{u}a}$ ise ($\Delta E_{\bar{u}a} = h\nu_{\bar{u}a}$) enerji seviyeleri arasındaki enerji farkıdır. Isısal dengede kara cisim ışımasında, birim frekans başına ışımanın hacim yoğunluğu (veya ışıma enerji yoğunluğu) [3];

$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3 [e^{h\nu/k_B T} - 1]} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, c ; ışık hızı, h ; Planck sabiti, T ; ortamın sıcaklığı, k_B ; Boltzmann sabiti, ν ; ışıma frekansıdır. Isısal denge ilkesine göre, kendiliğinden geçiş yapan elektronlar ile uyarılmış yayın yapan elektronların oranları toplamı, soğurma yapan elektronların oranına eşit olmalıdır:

$$N_{\bar{u}} A_{\bar{u}a} + N_{\bar{u}a} B_{\bar{u}a} u(\nu) = N_a B_{a\bar{u}} u(\nu) \quad (2.8)$$

Burada, $A_{\bar{u}a}$; kendiliğinden geçiş , $B_{\bar{u}a}$; uyarılmış ışıma (yayılma) ve $B_{a\bar{u}}$; soğurma katsayıları olup Einstein katsayıları olarak ifade edilir. Eşitlik (2. 6) ve Eşitlik (2. 7), Eşitlik (2. 8) ‘de göz önüne alınırsa;

$$A_{\bar{u}a} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{\bar{u}a} \quad (2.9)$$

ve

$$g_a B_{a\bar{u}} = g_{\bar{u}} B_{\bar{u}a} \quad (2.10)$$

şartları sağlandığında Eşitlik (2.7) geçerlidir. Bu durum ısısal denge ilkesi olarak adlandırılır [1, 3, 4].

2.4.2 Lazerin çalışma ilkeleri

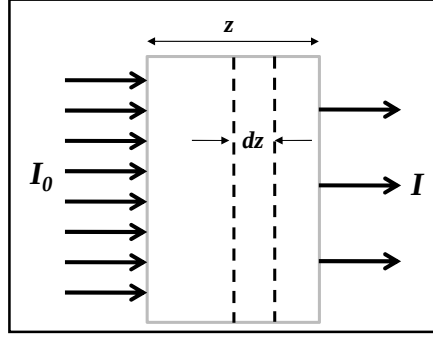
2.4.2.1 Lazer üretmek için gerekli koşullar

Bir lazer üretmek için şartlar vardır. Bu şartlar, etkin ortamı oluşturan atomların enerji seviyeleri arasındaki sayı (nüfus) yoğunluğu tersinimi oluşturmak ve kazanç elde etmektir.

Negatif Soğurma

Şiddeti I_0 olan ν frekanslı bir düzlem ışık kaynağı z kalınlıklı bir tabaka üzerine Şekil 2.5’ deki gibi gönderilirse ışık şiddeti, kesit alanı birim alan olan, dz kalınlığındaki tabakadan geçerken azalır. Bu azalma miktarı gelen ışık şiddeti ve soğurucu tabakanın kalınlığı ile doğru orantılı olmalıdır:

$$dI = -\alpha z dz \quad (2.11)$$

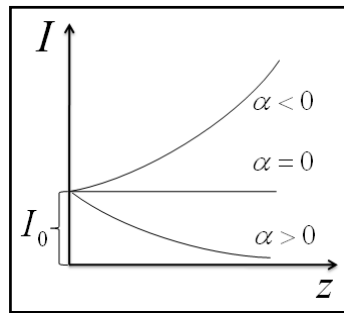


Şekil 2.5: Bir tabakadan ışığın soğurularak geçişi

α maddeyi karakterize eden bir büyüklüktür ve çizgisel (lineer) soğurma katsayısı olarak adlandırılır. Eşitlik (2.11), sıfırdan tabaka kalınlığı olan z ' ye kadar integre edilirse,

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.12)$$

elde edilir. I_z ; kalınlığı z olan tabakadan geçen ışık şiddetidir. Eşitlik (2. 12) Beer-Lambert kanunu olarak bilinir [1]. Eşitlik (2.12) 'den görüldüğü gibi ışık soğurma katsayısı pozitif olan ortamdan geçerken şiddeti azalmaktadır. Yani soğurma meydana gelmektedir. Klasik çizgisel (lineer) optikte $\alpha > 0$ 'dır. Bu durumda I 'nın z 'ye bağlılığı $\alpha > 0$, $\alpha = 0$ ve $\alpha < 0$ olduğu durumlarında Şekil 2.6' da gösterildiği gibidir. $\alpha < 0$ durumu açıkça gösteriyor ki ortamdan geçen ışık güçlenerek çıkacaktır. Bu olay negatif soğurma diye adlandırılır.



Şekil 2. 6: Şiddetin kalınlığa göre değişimi

Bilindiği gibi atomun enerji seviyeleri arasındaki optik geçişler durumunda tek renkli (monokromatik) ışık yayılır. Atomlarla elektromanyetik ışımanın karşılıklı etkileşimi halinde birbirinin tersi durumunda iki olay gerçekleşmektedir. **i)** Enerjisi E_1 olan

temel durumdaki atomlar dışarıdan gelen $h\nu = E_2 - E_1$ enerjili ışımayı soğurarak uyarılmış E_2 durumuna geçiş yapar. Bu geçiş ihtimali, B_{12} Einstein katsayısıyla orantılı olacaktır. **ii)** Enerjisi E_2 olan uyarılmış durumdaki atomlar dışarıdan gelen $h\nu = E_2 - E_1$ enerjili ışımanın etkisi ile E_1 temel durumuna geçiş yaparken $h\nu = E_2 - E_1$ enerjili bir foton yayar. Bu geçişin ihtimali ise B_{21} Einstein katsayısıyla orantılı olacaktır. Elektromanyetik ışımanın atomlarla karşılıklı etkileşmesiyle hiçbir alakası olmayan kendiliğinden geçişlerden dolayı meydana gelen ışımlar lazer ışıması şiddetine yeterli bir katkı sağlamadığı için toplam şiddet hesaplanmasında dikkate alınmayacaktır.

Kalınlığı dz , kesit yüzeyinin alanı ise birim olan madde tabakasından, hacimsel spektrum yoğunluğu $\omega(\nu)$ olan tek renkli paralel ışık demetinin geçmesi durumunda şiddetindeki değişme;

$$dI = -B_{12}\omega(\nu)N_1 h\nu dz + B_{21}\omega(\nu)N_2 h\nu dz \quad (2.13)$$

şeklinde dir. Burada N_1 ve N_2 , sırasıyla E_1 ve E_2 enerji durumlarında bulunan atomların birim hacimdeki sayısıdır. Bu sayılar;

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= N_0 e^{-E_1/k_B T} \\ N_2 &= N_0 e^{-E_2/k_B T} \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

şeklinde ifade edilir [1, 3].

Eşitlik (2.13) 'ün sağ tarafındaki birinci terim $(-B_{12}\omega(\nu)N_1 h\nu dz)$, dz kalınlıklı madde tabakasından geçerken soğrulmasından dolayı ışık şiddetindeki azalmayı, ikinci terim $(B_{21}\omega(\nu)N_2 h\nu dz)$ ise uyarılmış ışımada şiddetin artmasını ifade etmektedir. Eşitlik (2. 13) 'de $B_{12} = B_{21}$ ve $I = \mathcal{I}\omega(\nu)$ olduğu dikkate alınır,

$$dI = -I \frac{B_{21}}{\mathcal{I}} (N_1 - N_2) h\nu dz \quad (2.15)$$

olur. Burada $\mathcal{G}$ ışığın ortamdaki yayılma hızıdır ($\mathcal{G} = c/n$, n ; ortamın kırılma indisi). $\mathcal{G} \cong c$ olduğu dikkate alınır ve Einstein katsayılarının

$$B_{21} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3} A_{21}$$

ilişkisi göz önüne alınır Eşitlik (2.15);

$$dI = -I \frac{c^2}{8\pi\nu^2} A_{21} (N_1 - N_2) dz \quad (2.16)$$

ifadesine dönüşür.

Buraya kadar enerji seviyelerinin sonsuz derecede geniş olduğu (ideal) durum dikkate alındı. Bu durumda $E_1 \rightarrow E_2$ geçişine uygun gelen soğurma çizgisi (saçağı) sınırında $\omega(\nu)$ hacimsel spektral yoğunluğunu sabit kabul etmek mümkündür. Ancak, bildiğimiz gibi enerji seviyeleri sonsuz küçük değil, $\Delta\mathcal{E}$ genişliğe sahiptir. Bundan dolayı oluşan spektral çizgiler belirli bir genişliğe sahip olurlar [1]. Bunu göz önünde bulundurarak bant sınırları içinde farklı frekans çizgiler farklı soğurulduğuna göre $d\nu$ frekans aralığında, 2. seviyeden 1. seviyeye kendiliğinden geçiş için Einstein katsayısı $a_{21}(\nu)d\nu$ olacaktır. Benzer şekilde uyarılmış yayılma için $b_{21}(\nu)\omega(\nu)d\nu$ ve uyarılmış soğurma için $b_{12}(\nu)\omega(\nu)d\nu$ ifade edebiliriz. $a_{21}(\nu)$, $b_{21}(\nu)$, $b_{12}(\nu)$ sabitleriyle Einstein katsayıları arasında $A_{21} = \int a_{21}(\nu)d\nu$ ilişkisi vardır. Bu ifadeden anlaşılacağı gibi A_{21} ' in ölçü birimi sn^{-1} 'dir ve $a_{21}(\nu)$ birimsiz bir niceliktir. Eşitlik (2. 16) bütün çizginin uygun enerji soğurmasını ifade ettiğinden birim frekans aralığına uygun gelen soğurma;

$$dI = -I \frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_1 - N_2) d\nu dz \quad (2.17)$$

olarak yazılır. Bu ifade çözümlenirse;

$$\ln I = -\frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_1 - N_2) z + \text{sabit} \quad (2.18)$$

ve $z=0$ için $I = I_0$ başlangıç şartlarından

$$\ln I = \frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_2 - N_1) z + \ln I_0$$

$$I = I_0 e^{-\frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_1 - N_2) z} \quad (2.19)$$

elde edilir. Eşitlik (2. 19), Eşitlik (2. 12) ile karşılaştırılırsa soğurma katsayısı;

$$\alpha(\nu) = \frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_1 - N_2) \quad (2.20)$$

şeklinde bulunur. Eşitlik (2.20) incelendiğinde $\alpha < 0$ olması için $N_2 > N_1$ olmalıdır. Diğer taraftan termodinamik denge için doğru olan Eşitlik (2.14) göz önüne alındığında $E_2 > E_1$ olduğundan $N_1 > N_2$ olmalıdır. $T \rightarrow \infty$ olduğu durumda $N_1 = N_2$ olabilir. Buradan çıkarılan sonuç “termodinamik denge halinde” olan sistem için $\alpha \geq 0$ olduğundan negatif soğurma diğer bir deyişle ışığın güçlenmesi mümkün değildir. Negatif soğurma olması için $N_2 > N_1$ olması gerekir. Bu da uyarılmış haldeki atomların sayısı temel haldeki atomların sayısından büyük olmalıdır. Atomların enerji seviyelerine göre böyle bir dağılım “sayı yoğunluğu tersinimi” olarak adlandırılır.

Ayrıca $\alpha(\nu)$ soğurma katsayısı lazer elde etmek için gerek ve yeter şartlardan olan kazancı ifade eden kazanç katsayısının negatifidir [4]:

$$\alpha(\nu) = -g(\nu) \quad (2.21)$$

Yani kazanç elde etmek için sistemin soğurma katsayısının sıfırdan küçük ($\alpha(\nu) < 0$) olması gerekir.

2.4.2.2 İki seviyeli sistemlerde sayı yoğunluğu tersinimi

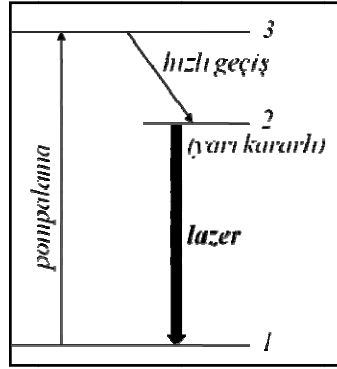
İki seviyeli bir sistemde termodinamik denge halinde Eşitlik (2.14) ifadelerinden $(N_2/N_1) = e^{(E_1 - E_2/k_B T)}$ oranının her iki tarafının logaritması alınır

$$T = \frac{E_1 - E_2}{k_B \ln \frac{N_2}{N_1}} \quad (2.22)$$

elde edilir. Her zaman $E_2 > E_1$ ve aynı zamanda termodinamik denge durumunda $N_1 > N_2$ olduğundan $T > 0$ olur. Bu ifadeye göre $N_2 > N_1$ olduğu durumda yani sayı yoğunluğu tersinimi durumunda $T < 0$ olur. Bu fiziksel bir anlam ifade etmez. Uyarımalı geçiş katsayıları $B_{12} = B_{21}$ olduğundan birim zamandaki $E_1 \rightarrow E_2$ ve $E_2 \rightarrow E_1$ sayısı eşit olacaktır. Yani uyarımalı geçişler sonucunda atomların enerji seviyelerine göre dağılımı değişmeyecektir; $N_2/N_1 = \text{sabit}$. Diğer taraftan termodinamik denge halinde $N_1 > N_2$ 'dir. Işığın etkisi ile iki enerji seviyesi olan sistemde N_2/N_1 oranı değişmeyeceğinden, yine de $N_1 > N_2$ olacaktır. Yani iki seviyeli bir sistemde lazerin oluşması için gereken şartlardan biri olan sayı yoğunluğu tersinimi oluşmamaktadır. Sonuç olarak, sayı yoğunluğu tersinimi oluşturmak için ortam atomlarının en az üç enerji seviyesine ihtiyaç vardır.

2.4.2.3 Üç ve dört seviyeli sistemlerde sayı yoğunluğu tersinimi

Bir kazanç ortamında (lazer ışınının olduğu ortam, kazanç ortamı) sayı yoğunluğunu tersinimi elde etmek için yapılması gereken işlem “pompalama” olarak adlandırılır. Işıkla karşılıklı etkileşen üç enerji seviyeli bir sistem (Şekil 2.7), $h\nu = E_3 - E_1$ enerjili elektromanyetik ışıması ile etkileşimi sonucu E_1 durumundan E_3 durumuna geçer. E_3 durumundaki atom ise kendiliğinden E_2 ve E_1 durumlarına geçiş yapabilir.



Şekil 2.7: Tipik bir katıhal lazeri enerji seviyeleri

Bu sistemde sayı yoğunluğu tersinimi oluşturmak için E_2 durumu E_3 durumuna göre daha uzun ömürlü olmalıdır. Diğer bir ifade ile elektronlar E_2 enerji seviyesinde daha uzun süre beklemelidir. Yani

$$\left. \begin{array}{l} \tau_{21} \gg \tau_{31} \\ \tau_{21} \gg \tau_{32} \end{array} \right\}$$

olmalıdır. Bu süreler τ_{32} ve τ_{31} yaklaşık 10^{-6} sn, τ_{21} ise 10^{-3} sn mertebesinde. Eşitlik (2. 2) dikkate alındığında

$$\left. \begin{array}{l} A_{21} \ll A_{31} \\ A_{21} \ll A_{32} \end{array} \right\} \quad (2.23)$$

olur. Lazerin oluşması şartlarından biri olan sayı yoğunluğu tersinimi şartını yerine getiren E_2 enerji seviyesi “yarı kararlı” enerji durumu olarak adlandırılır. Böyle bir

sistem enerjisi $h\nu = E_3 - E_1$ olan elektromanyetik ışıması etkisiyle belirli bir süre sonra elektronların enerji seviyelerine göre dağılımı durumunda $N_2 > N_1$ olur. Dolayısıyla elektromanyetik ışık etkisiyle temel durumdaki elektronlar basamaklı olarak E_1 enerji seviyesinden E_3 enerji seviyesine, E_3 seviyesinden de E_2 enerji seviyesine geçiş yaparak “pompalanmış” olurlar. Böyle bir sistemde lüminesans oluşabilir: elektron kendiliğinden E_2 durumundan E_1 temel durumuna geçiş yapabilir. Bu geçişe karşılık gelen $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ enerjili bir foton yayınlanır. Lüminesans sonucunda meydana gelen bu foton, sayı yoğunluğu tersinimine sahip etkin ortam içinde yayınlanırken ışık şiddetinin büyümesine yani ışığın güçlenmesi sebep olur. Eşitlik (2. 19)’ da $N_1 - N_2$ terimi sayı yoğunluğu tersinimi durumunda ($N_2 > N_1$) negatif değere sahiptir. $N_2 - N_1 > 0$ olacağından Eşitlik (2.19) son hali;

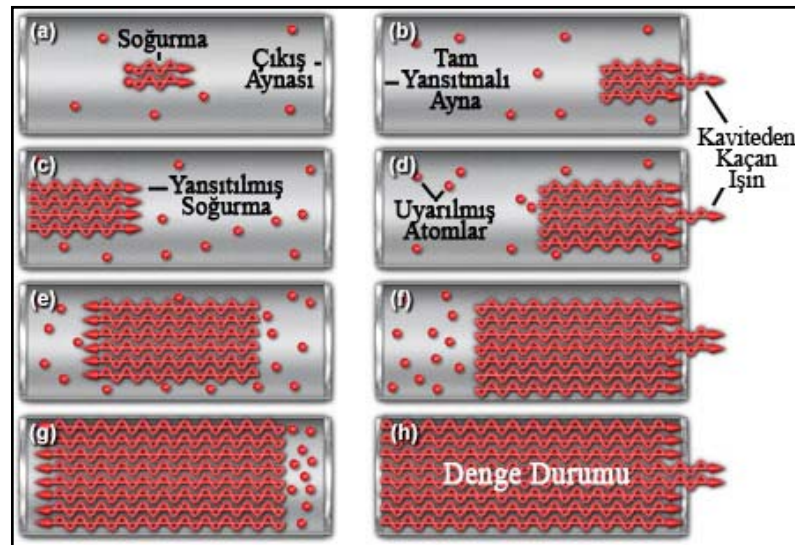
$$I = I_0 e^{\frac{c^2}{8\pi\nu^2} a_{21} (N_2 - N_1) z}$$

olacaktır. Burada “e” üzerindeki ifadenin pozitif olduğu gözükmemektedir. Bu da demek oluyor ki etkin ortam içinden ışık geçtiğinde ışığın şiddeti geçtiği yolun uzunluğuna bağlı olarak büyüyecektir: $I > I_0$.

Etkin ortamdan geçen ışığın verimli büyümesi için ışığın ortam içinde geçtiği yolun uzunluğunu büyütmek gerekir. Bu işlem için iki yöntem kullanılır. Birincisi, ortamın kendisinin çapı büyük olması, ikincisi ise yansıtma yolu ile ortam içinde birçok kez sağa sola yayılması için ışığın ortam içerisinde gittiği yol uzunluğu büyültülmelidir. Pratikte bu yöntemlerden hangisinin seçileceği kullanımın önemliliğine bağlıdır. Ergonomik açıdan düşünüldüğünde ikinci yöntem daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemde, etkin ortamın ölçütleri değiştirilmeden etkin ortam, birbirine paralel iki düzlem veya küresel aynalar arasına yerleştirilerek ışığın bu ortamda aynı doğrultuda oldukça fazla sayıda sağa sola hareket etmesi sağlanarak ışık güçlendirilir. Böyle ayna sistemleri rezonatör olarak adlandırılır. Bu düzenek sadece ışığın etkin ortamda yolunu uzatmakla kalmayıp yüksek derecede ve paralel tekrenkli ışık demeti (lazer ışığı) elde etme imkânı da verir.

2.4.2.4 Tipik bir katıhal lazerin çalışması

Kuramsal temellerini açıklanan lazer ışınının elde edilmesini, etkin maddesi katı bir cisim olan bir lazer sistemini açıklayarak özetleyelim. Silindir şeklinde hazırlanmış bir kristal rezonatör aynaları arasına, silindirin taban alanları aynalara paralel olacak şekilde yerleştirilir. Bu ortamı etkin hale getirmek için pompalama kaynağı olarak flaş lambalar kullanılabilir. Rezonatör aynalarından biri lazer ışığının ondan geçerek çıkması için gerekli derecede yarı saydam hazırlanır. Pompalama lambası ışıması frekansı $\nu_{31} = E_3 - E_1/h$ olan kısmi pompalama işine başladığında atomlar E_3 enerji durumuna geçerler. Bir müddet sonra E_3 durumundaki atomlar kendi enerjisinin $E_3 - E_2$ kadarını kristal kafesine vererek ışımasız olarak E_2 yarı kararlı enerji seviyesine geçiş yapar. Atomlar olağan bir şekilde enerji farkına göre farklı dalga boyunda (ya da enerjide) ışıma yaparak E_2 durumundan E_1 durumuna geçebilir. Kendiliğinden oluşan bu geçiş henüz lazer ışıması olarak ortaya çıkmaz. Bu ilk ışıma (lüminesans) sadece oluşacak lazer ışımasının “öncüsü” rolü oynayacaktır. Bu ışımının etkisiyle oluşan uyarmalı geçişler lazer ışıması olacaktır. Kendiliğinden geçiş sonucunda oluşan bu fotonlar kristalin eksenine paralel olmayanları; ya doğrudan ya da aynalardan birçok defa yansıdıktan sonra kristal içinden çıkar. Silindir eksenine paralel olan her foton ise eksene paralel yayılarak defalarca rezonatör aynalarından yansıyarak her seferinde kendisine özdeş olan yeni bir foton meydana getirir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: Lazer ışını oluşumu [13]

Lüminesans sonucu oluşan foton E_2 durumundaki elektronlarla etkileşerek elektronu E_1 durumuna geçirir ve bu durumda tamamen kendisinin aynısı olan bir foton oluşturur.

Etkin ortam boyunda salınım yapan bu fotonların sayısı zincirleme olarak basamaklı büyür. Fotonların sayısının uyarılmış geçişler sonucunda bu tür zincirleme büyümesi belirli bir durumu kadar devam eder. Meydana gelen ışıma şiddeti; rezonatördeki kırınım (diffraction) kayıpları ve rezonatörün çıkış yarı-geçirgen aynanın geçirgenliğine bağlı olarak, belirli değere kadar büyüyünce yönlenmiş ışık demeti yani lazer ışını sistemden dışarı çıkar.

Güçlenme elde etmek için rezonatörden çıkan dalgalar aynı fazda olmalıdır. Rezonatörün çıkış aynası üzerindeki (aynı zamanda etkin ortam içindeki) her önceki noktaya geri dönen her dalga, onun ayna yüzeylerinden çok kez yansımaya bağlı olmadan, ilk fazına eşit faz ile yansımaya sonucu yerine gelmelidir. Bunun için dalganın verilmiş iki ardışık yansıması arasındaki zaman süresinde yayıldığı yolun uzunluğu, yani; rezonatör aynalar arasındaki mesafenin iki katı ile λ arasında

$$2L = m\lambda \quad (2.24)$$

şartı yerine gelmelidir. Burada $m = 1, 2, 3, \dots, L$; aynalar arasındaki mesafedir. Gerçekten, fazlar farkı ile yollar farkı arasında $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta L$ ilişkisi olduğundan Eşitlik (2. 24) şartı

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{m\lambda}{\lambda} = m.2\pi$$

şeklinde yazılabilir. Yani her dalga fazca öncekine göre 2π kadar gecikir. Diğer bir ifade ile çıkan bütün dalgalar aynı fazlı olur. Bu ise çıkan dalgaların genliklerinin girişim sonucunda maksimum olmasını sağlar.

2.4.2.5 Lazer pompalama yöntemleri

Pompalama optik, elektrik vs. yöntemlerle yerine getirilmektedir. Optik pompalama durumunda atomlar, üzerine gelen ışık enerjilerini soğurarak uyarılmış hale geçer. Elektrik pompalaması durumunda ise (örneğin gaz ortamlarda) atomlar gaz boşalması işleminde elektronlarla esnek olmayan çarpışmalar sonucu olarak uyarılmış hale geçerler.

2.5 Lazer Işınının Özellikleri ve Uygulama Alanları

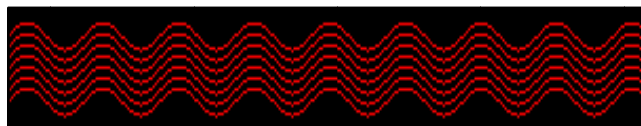
Lazer ışınını diğer ışınlardan ayıran özelliklerinden dolayı pek çok alanda kullanım kolaylığı sağlar.

2.5.1 Lazer ışınının özellikleri

Lazer ışını tek renklilik, yönlendirilebilirlik ve şiddet özellikleri bakımından normal ışık kaynaklarından ayrılmaktadır.

2.5.1.1 Tek renklilik

Rezonatörden çıkan dalgalar aynı fazda olduğundan ve her foton kendine özdeş $h\nu_{21} = E_2 - E_1$ enerjili bir foton ürettiği için sadece frekansı $\nu_0 = (E_2 - E_1)/h$ olan yani gelen foton ile aynı enerji ve frekansa sahip elektromanyetik dalga çıkışı olur. ν_0 kesin bir değere sahip olup ve çizgi genişliği olarak adlandırılır. Bu frekans değeri aynı zamanda bir dalgaboyuna karşılık geldiğinden tek renkli bir ışın elde edilir. Sonuç olarak diğer ışık kaynakları ile karşılaştırıldığında bu çizgi genişliği çok dardır. Lazer kovuklarında (cavity) sadece rezonans frekansında salınım meydana gelir. Bu, lazer çizgi genişliğinin daha da daralmasına neden olur. Bu daralma 10 kat büyüklükte olabilir. Bundan dolayı lazer ışıkları dalga boyu bakımından saftırlar. Bu özelliğine tek renklilik (monochromatic) denir [4].



Şekil 2.9: Lazer demetinin uyumluluğu

2.5.1.2 Yönlendirilebilirlik

Lazer ışını yüksek derecede tek renkliliğinin yanı sıra birbirine paralel olan ışınlardan oluşan demet biçimine sahiptir. Bir elektromanyetik dalganın mükemmel uyumluluğu uzaysal ve zamansal uyumluluk olmak üzere iki türlü ifade edilir. Bir elektromanyetik dalganın dalga cephesi üzerinde aralarında faz farkı olan iki nokta dikkate alındığında zaman değişimine karşın bu iki nokta arasındaki faz farkı değişmiyorsa zamansal yönden uyumlu olduğu söylenir. Diğer taraftan dalga cephesi üzerinde sabit bir nokta dikkate alındığında herhangi bir zaman aralığında faz farkı değişmiyor ise zamansal gecikme periyodu altında zamansal uyumlu olduğu söylenir. Lazer ışının bu özelliği hem uyarılmış yayılmanın hem de rezonatörün etkisi ile ilgilidir. Bilindiği gibi dalga cephesinin sınırlandığı bütün durumlarda kırınım olmaktadır. Lazer sisteminde ışık üretimi olduğu zaman dalga cephesi, silindirik kristalin taban alanı veya çapı R_A olan aynanın kenar sınır çizgisi ile sınırlıdır. Kırınım kuralına göre paralellikten sapmayı açıklayan açının mümkün olan en küçük değeri;

$$\theta_{\min} = \frac{1,22\lambda}{R_A}$$

ile ifade edilir. Gerçek durumda paralellikten sapma $\theta > \theta_{\min}$ olur. Sapma açısı lazer demeti için çok küçüktür yani yüksek derecede yönelimlidir.



Şekil 2.10: Lazer demetinin yönlendirilebilirliği

2.5.1.3 Şiddet

Pompalama ışımasının gücü arttıkça oluşan lazer ışımasının da şiddeti artar. Tabi bu artma, yarı kararlı durumdaki atomların sayısı arttıkça kendiliğinden ışımaya katılan atomların sayısının çoğalması ile ilgili olduğundan sınırlıdır.

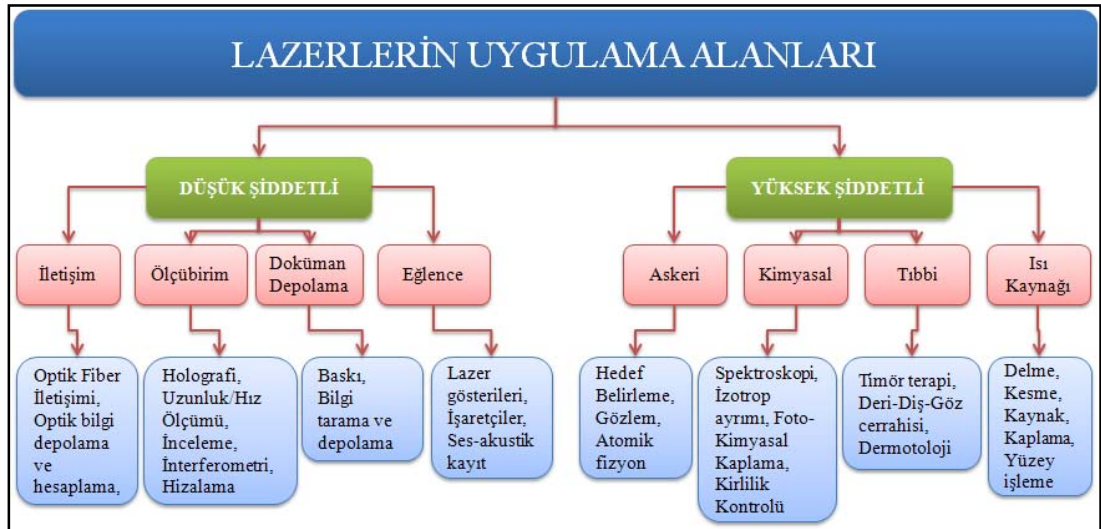
Lazerler, 10^6 (watt/m²) mertebelerinden başlayan güçlere sahip ışıma verir [4]. Lazer ışımalarının elektrik alan şiddetinin genlik değerini belirlemek mümkündür. Paralel ışık demetinin şiddeti;

$$I = \frac{E}{A\tau}$$

şeklinde yazılabilir. Burada I , (watt/cm²) olduğu dikkate alınırsa $E = 2.10^6$ (watt/cm) olur. Atom içinde elektrona etki eden mikroskobik alan şiddeti bu mertebeden olduğundan lazer ışınının oldukça şiddetli olduğunu söyleyebiliriz [1].

2.5.2 Lazerin uygulama alanları

Günden güne geliştirilen lazer sistemleri ile otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisi gibi pek çok endüstride malzeme işleme süreçlerinde sağlık uygulamaları, iletişim ve savunma sanayisi gibi birçok alanda kullanılmakta olduğunu giriş kısmında ifade etmiştik. Şekil 2.9' da lazerlerin uygulama alanları verilmiştir.



Şekil 2.11: Lazerlerin uygulama alanları [4, 14]

Lazerlerin uygulamalarda tercih sebebi yüksek işlem hızı, yüksek kalite, düşük ısısal zarar ve temiz bir işlem ortaya çıkarmasıdır. Lazer sistemleri çok büyük enerjiyi küçük alanda toplayabildiği için:

- a) Zor eriyen malzemeleri işleme,
- b) Kaynak, kesme ve eritme işlemleri,
- c) Çok küçük delikler delme işlemleri,
- d) Kimyasal tepkimelerin gelişimine etki etme işlemleri,
- e) Canlı organizmanı dış yüzeyine zarar vermeden organ içinde hassas cerrahi müdahaleler yapma işlemleri,
- f) Çok hassas mesafe ölçme işlemleri,
- g) Holografi işlemleri,
- h) Bilgi aktarımı (iletişim)

gibi işlemlerde kullanılmaktadır.

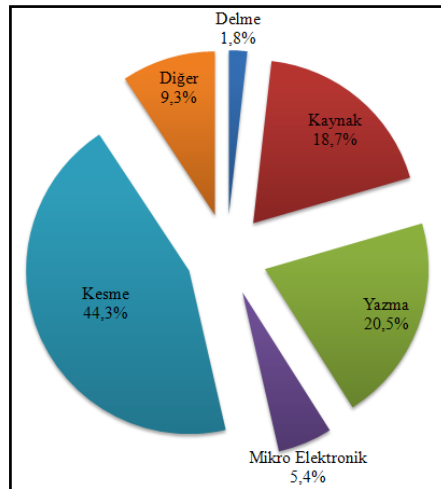
Teknolojik gelişmelerin ışığında bugüne kadar elde edilen lazerlerin atım süresi attosaniye (10^{-18}) mertebesinde [4].

BÖLÜM 3. LAZERLE MALZEME İŞLEME (KESME, KAYNAK, DELME)

Lazerler yüksek yoğunluklu enerji kaynağı olarak birçok farklı malzemenin kesme, delme, kaynak, yüzey işleme gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. Yüksek işlem hızı, düşük ısısal zarar, yüksek işlem kalitesi ve tekrarlanabilirlik gibi avantajları malzemelerin lazerler ile işlenmesinin en önemli nedenleridir. Bu bölümde; Lazer ışığının malzeme ile etkileşimi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar, lazerler ile gerçekleştirilen delme teknikleri ve lazer parametrelerinin delme işlemi üzerindeki etkisi ve deneysel çalışmalarda hedef olarak kullanılan polimerler hakkında bilgiler verilecektir.

3.1 Giriş

Lazerin yüksek işlem hızı, düşük ısısal zarar, yüksek derinlik/genişlik oranı ve temiz bir işlem ortaya çıkarması gibi yüksek yoğunluklu enerji kaynağı olduğundan malzeme delme, kesme, kaynak, yüzey işleme gibi alanlarda tercihen kullanılmaktadır. İlerleyen teknoloji ile birlikte ihtiyaç duyulan mikrometre (10^{-6}) boyutlu malzemelerin işlenmesinde lazer sistemlerine duyulan ihtiyaç daha da artmaktadır. Birkaç yıl öncesinin araştırmalarına göre lazerlerin kullanım alanlarına göre dağılımı Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1: Lazerlerin kullanım alanlarına göre dağılımı [4].

Lazerle malzeme kesme işlemleri, lazer ışınının veya malzemenin hareket ettirilmesi ile meydana gelir. Lazerle kesme işlemindeki amaç, ısıdan etkilenmiş bölgesinin ve malzemede oluşabilecek yüzey bozulmalarını en aza indirmek için kesme bölgesini olabildiğince hızlı bir şekilde buharlaştırmaktır. Bu kesme işlemine yardımcı olmak ve optik düzeneğin malzemeden gelecek saçılmalardan korumak için ısıveren (exothermal) bir gaz çeşidi kullanılır. Bu gaz metalin sıcaklığını artıracığından buharlaşma yani işlem hızı artırılmış olur. Aynı zamanda kesme sırasında oluşan erimiş metali dışarı atma işine de yarar.[4]

Lazerlerin en çok kullanıldığı diğer bir işlem de malzemelerin kaynak yoluyla birleştirilmesidir. Otomotiv, uzay ve gemicilik endüstrilerinde metal levhaların birleştirilmesi işlemlerinde lazerlerin kullanımı gittikçe artmaktadır. Diğer kaynak tekniklerine göre lazerle kaynak işlemi aynı veya farklı malzemeleri yüksek kalitede birleştirilmesini sağlar. Çok yönlülüğü ve verimliliği açısından elektron demet kaynağı ile kıyaslansa da elektron demet kaynağı vakum ortamına ihtiyaç duyduğundan lazerle kaynak işlemi pratikte avantajlıdır. Kaynak işleminde lazerler, kaynak genişliğinin küçük olması, ısıdan etkilenmiş bölgenin çok az olması (malzeme ısınma-soğumadan dolayı fazla yorulmaz) ve malzemede daha az eğilmeye neden olması gibi sebeplerden dolayı tercih edilirler.

Lazerle delme işleminin ise havacılık, mikro mekanik, mikro elektronik ve otomotiv endüstrilerinde çok büyük öneme sahiptir. Lazerle delme, küçük (mikro) delik delme imalat yöntemleri kullanılan diğer tekniklere göre çok daha iyi yararlar sağladığı için endüstriyel işlemlerde önemli olmuştur. Lazerle delme işlemi hakkında ayrıntılı bilgi Bölüm 3. 3 'de verilecektir.

3.2 Malzeme İşleme Sırasında Gerçekleşen Fiziksel Olaylar

Bu bölümde yüksek güçlü lazer ışımalarının madde ile etkileşimi esnasında meydana gelen fiziksel süreçlerden bahsedilecektir. Lazer ışını, üzerine düşürülen hedef tarafından soğurulmakta veya yansıtılmaktadır. Ayrıca soğurulan ışın malzemede erime ve buharlaşmaya neden olur. Bu fiziksel olayları/süreçleri ve malzemenin özelliklerini göz önünde bulundurmak lazerle malzeme işleme sınırlarını ve

kapasitesini bilmek açısından önemli ve bir o kadar da karmaşıktır. Ayrıca bu etkileşimler lazerle malzeme işlemede lazer uygulamaları için bir temeldir [15, 16]. Bu bölümde elektromanyetik ışıma ve madde arasındaki etkileşmeden bahsedilecektir. Bilindiği gibi lazer ışını bir elektromanyetik ışımadır. Bir maddenin elektromanyetik ışıma ile etkileşimini inceleyebilmek için maddenin optik ve ısısal özelliklerini bilmek gerekir.

3.2.1 Maddenin optik özellikleri

Madde ile elektromanyetik ışının karşılaşmasında yansıma ve soğurma gibi maddenin optik özellikleri ile ilgili fiziksel olaylar gerçekleşir. Maddelerin optik özelliklerini incelerken elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine odaklanmak yarar sağlayacaktır. Görünür bölge alanı, 380 – 780 nm arası dalga boyu aralığına; 3,3 – 1,6 eV enerji aralığına; $\sim 10^{14}$ - 10^{15} Hz frekans aralığına karşılık gelmektedir. Elektromanyetik ışıma yalnızca maddeyi oluşturan atomların, çekirdeğe uzak olan ve zayıf bağlı bulunan elektronlarıyla etkileşir. Etkileşen bu elektronlar ışıma enerjisini soğurarak serbest hale geçer. Soğurulan bu enerji ya tekrar yayınlanır ya da kafese (lattice) aktarılır. Salınan elektronlar sahip oldukları elektrik alandan dolayı malzemede gözle görülür bir $\vec{P}$ kutuplanması oluştururlar. Bu $\vec{E}$ elektrik alan ile $\vec{P}$ kutuplanması arasında

$$\vec{P} = \varepsilon(\omega) \varepsilon_0 \vec{E} \quad (3.1)$$

bağıntısı vardır. Burada $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$ karmaşık (complex) dielektrik fonksiyonu olup karmaşık kırıcılık indisi $n_k(\omega) = n + ik$ şeklindedir. Burada;

$$\left. \begin{aligned} n &= \frac{\sqrt{\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}}{2} \\ k &= \frac{\sqrt{-\varepsilon_1 + \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

olmak üzere n ve k sırasıyla kırıcılık indisi ve sönüm katsayısı olarak adlandırılır. Yüzeye çarpan ışık için, bir malzemenin yansıtıcılığı gelen ışın yoğunluğunun yansıyan ışın yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır ve

$$R_{\perp} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Buger-Lambert ifadesine göre: yalnızca soğuran madde ($k \neq 0$) için, elektromanyetik dalganın yoğunluğu malzeme içinde yayılımı üstel olarak azalmaktadır: Eşitlik (2.12).

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z}$$

Soğurma katsayısının (α) negatifi optik derinliktir ve malzemedeki demetin soğurulması üzerinden ortalama derinliği verir. Diğer bir ifade ile soğurma katsayısı maddesel bir özellik olup çok küçük miktardaki optik enerjinin madde içinde birim derinliğe depolanmasını ifade eder. Burada soğurma katsayısı (α), sönüm katsayısı (k) cinsinden;

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilir.

Frekansa duyarlı soğurma katsayısı α , malzemenin soğurmasının önemli ölçüde malzemenin elektronik karakteristiklerine bağlı olduğunu ve elektronların malzeme içinde bağlı elektronların nasıl rezonansa geldiğini gösterir. Rezonans frekansı, malzeme içindeki bir elektronun, bağlı bir enerji seviyesinden, daha yüksek enerjili bir diğer bağlı seviyeye geçmesini sağlayan gelen elektrik alan frekansıdır.

Genellikle malzemeler elektron bant yapısına göre iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olarak sınıflandırılırlar. İdeal yarıiletkenler ve yalıtkanlarda iletkenlik

bantlarındaki bütün yörüngeler boş, değerlik bantlarındaki bütün yörüngeler doludur. Yarıiletkenler için malzemedeki bağlı elektronlara sönümlü harmonik (uyumlu) salınıcılara benzer şekilde klasik Lorentz modeli uygulanabilir. Bu model, elektronlar gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan kuvveti etkisiyle salınım yaptığını söyler ve bir boyuttaki yaklaşım,

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{\left\{ i \frac{2\pi z}{\lambda} - i\omega t \right\}} \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada λ dalgaboyu, ω açısal frekans ve t zamandır.

Malzemenin tepkisi (cevabı) dielektrik fonksiyonu $\varepsilon(\omega)$ tarafından tanımlanır.

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \omega_p \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\Gamma_k \omega^2} \quad (3.6)$$

Burada $\omega_p = \frac{Ne^2}{\varepsilon_0 m}$ (malzeme – elektromanyetik dalga etkileşmesiyle) oluşan plazmanın salınım frekansı, Γ_k sönüm sabiti, rezonans frekans genişliği ω_0 ‘dir.

Klasik modelde bir rezonans durumunda, elektrik alan frekansı uyumlu (harmonic) salınıcı rezonans frekansı ω_0 ‘ la eşlenir. Kuantum mekaniğinde ise bir rezonans ayrılmış iki seviye arasındaki bir geçişteki $\Delta E = \omega_0 h / 2\pi$ enerji farkına karşılık gelir. Ek olarak, salınıcı sertliği olarak isimlendirilen bir etkenle bu çoğaltılır ve geçiş olasılığı hesabına da eklenir. Bu geçişler bir bant (iç bant, intraband) veya bantlar (ara bant, interband) arasında meydana gelebilir. Çok önemli rezonanslar gelen foton enerjisine en az eşit olan enerji bant aralığı ikinci durumda bulunur. Geniş bant aralıklarına sahip yalıtkanlarda genellikle bir geçiş meydana gelmesi için ultraviyole ışın gerekirken, yarıiletkenlerde geçiş için görünür veya kızılaltı ışın yeterli olabilir.

Maddenin optik özelliklerinden biride soğurmadır. Bir elektromanyetik ışın bir malzeme ile etkileşmesiyle elektromanyetik dalganın bir kısmı yansır bir kısmı

soğurulur. Lazer demetinin malzeme tarafından soğurulması lazer ışının dalga boyu, malzemenin iletkenliği gibi elektriksel özelliklerine, lazer demetinin malzeme yüzeyine gelme açısına, kutuplanmaya ve odaklanma şiddetine bağlıdır [4]. Malzemelerin elektriksel özellikleri soğurma işlemini belirlediğinden elektromanyetik ışının (veya lazer ışınının) dalga boyuna göre soğurma değişiklik gösterir. Bilindiği gibi malzemelerin iletkenliği serbest iletim elektronlarının yoğunluğuna bağlıdır. Bu elektronlar yüksek hızla hareket ettiğinden düşük frekansa sahip lazer ışınının (mesela CO₂ lazeri ışını) oluşturacağı elektrik alanında salınım yaparlar. Yüksek hızla hareketten dolayı düşük frekanslı lazer ışınının bir kısmı geri yansır. Altın, gümüş, alüminyum ve bakır gibi yüksek iletkenliği sahip metallerin düşük frekanslı lazer ışınının az bir kısmı soğurulur. Yüksek frekanslı lazer ışını (Nd:YAG Lazeri) kullanıldığında ise soğurma işleme örgü atomları tarafından yapılır. Plastik gibi yalıtkan malzemelerde iyonlaşma enerjisi yüksek olduğundan önemsiz derecede soğurma mükemmel derecede geçirgenlik gözlenir. Metal malzemeler de ise bu işlem önemli derecede soğurma olur. Önceki bölümde optik enerjinin madde içinde birim derinliğe depolanmasını ifade eden soğurma katsayısından bahsedildi. Madde içinde ışının, Δz kadar küçük derinlik artmalarıyla depolanan enerji;

$$|\Delta E(z)| = E_0 \alpha e^{-\alpha z} \Delta z \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada E_0 yüzeye gelen enerjidir. Yüzeydeki depolanan enerji miktarı maksimum olur. Işının malzemenin içerisine ilerlemesiyle birlikte tekdüze (monoton) bir şekilde azalmaktadır [4, 15].

Optik derinlik (δ) soğurma katsayısının tersi olduğundan;

$$\delta = \frac{\lambda}{4\pi k} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir [4, 17].

Buradan anlaşıldığı gibi lazerle malzeme etkileşiminde malzeme yüzeyindeki etkileşim, gelen ışının dalga boyuna bağlı soğurma katsayısı, yansıma ile ifade edilir.

3.2.2 Maddenin ısısal özellikleri

Hedef üzerine düşürülen lazer ışınının madde ile etkileşmesi esnasında, ışın madde tarafından soğurularak madde içinde ısıya dönüştürülür ve ısı madde içinde yayılır. Malzemede ısı enerjisi akışı ve sıcaklık dağılımı gibi ısısal aktarım özellikleri bu safhada önemlidir. Bu özellikler ısısal iletkenlik ve ısısal yayılımı içerir. Termodinamik özellikler ise malzemede erime veya buharlaşma gibi bir faz değişimine sebep olacak kadar gerekli miktarda ısı enerjisi miktarı ile ilgilidir. Burada öne çıkan değişkenler yoğunluk, ısı sığası, erime sıcaklığı, buharlaşma sıcaklığı, erime gizli ısısı (olaya katılan ve sıcaklıkta değişiklik oluşturmeyen ısı) ve buharlaşma gizli ısısıdır (sıcaklık sabit kalmak şartıyla birim miktarda malzemeyi buhar haline getirmek için malzemeye verilmesi gereken ısı miktarı) [15]. Bu iki tip özellik genel olarak lazerle malzemenin etkileşmesi esnasında malzemede meydana gelen fiziksel özelliklerdir.

Bilindiği gibi elektromanyetik ışın elektromanyetik alana ve dolayısıyla elektromanyetik kuvvet özelliğine sahiptir. Malzeme üzerine düşen elektromanyetik ışın (lazer ışını) malzemeye elektromanyetik kuvvet uygular. Bu kuvvet malzemeyi oluşturan atomlar ya da molekülleri harekete zorlar. Gelen ışınmayı soğuran atomlar titreşime başlar. Bu atomlar ya her yönde ışıma yapacak ya da malzeme örgü fononları tarafından soğurulur. İkinci durum gerçekleştiği takdirde atomlar ya da moleküller arasındaki bağlardan dolayı titreşim bütün yapıya yayılır. Bu titreşim malzemede ısı olarak açığa çıkar [4]. Lazer enerjisini soğurmak için gerçekleşen tepkime malzemenin içindeki ısı akışına dayanmaktadır. Isı akışı, ısısal iletkenliği κ ya bağlıdır. Fakat ısısal iletkenlik, ısı akışını etkileyen tek etken değildir. Çünkü sıcaklık değişim oranı malzemenin özgül ısısına (c) bağlıdır. Isıtma oranı birim hacimdeki ısı sığası ile ters orantılıdır. Birim hacimdeki ısı sığası ρc olup burada ρ malzeme yoğunluğudur. Bu durumda ısı akışı için önemli etken

$$k = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir. k , ısısal iletkenlik olup birimi cm^2/s ' dir. Aynı zamanda bir yayılma katsayısı olarak karakterize edilir. Böylece “ısısal yayılma” terimi ısı için yayılma katsayısı olarak ifade edilir. Bu yayılma katsayısı etkeni atımlı lazer ısıtması (ısı aktarımı) gibi kararlı durumda olmayan bütün ısı akış işlemlerini kapsar. Bu malzeme özelliğinin önemi, bir malzemenin ısısal enerjiyi nasıl hızlı kabul etmesini ve iletmesini tanımlar. Böylece kaynak işleminde olduğu gibi yüksek ısısal iletkenlik, ısısal şok veya kırılma olmadan önce derinlemesine nüfus etme oranının büyük olmasını sağlar [4, 15]. Belirli bir t zamanında ısısın ne kadar derinliğe nüfus edeceği yaklaşık olarak;

$$D = (4kt)^{1/2} \quad (3.10)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada D , nüfus etme derinliği ve k , ısısal yayılma katsayısıdır.

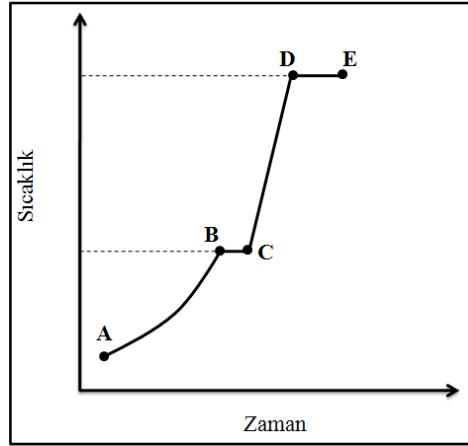
Isı akışını etkileyen bir diğer önemli değişken ise ısısal zaman sabitidir (t_I) ve ısısın belirli bir derinliğe ilerlemesi için gereken zaman olarak tanımlanır ve $t_I = x^2/4k$ eşitliği ile ifade edilir. Burada x metal bir tabakanın kalınlığıdır. Isısal zaman sabiti, ısısın özel bir derinliğe ulaşmasını için zaman uzunluğunu betimler [15].

Isısal zaman sabiti, malzemenin üzerine bir atım düştüğünde arka yüzey sıcaklığının ön yüzey sıcaklığının %37 si olana kadar geçen zamandır. Bu zaman bir plaka boyunca ilerleyen ısı akışı için gerekli uygun zaman aralığı hakkında fikir verir. Bununla birlikte bu sabit, tam derinlemesine nüfus için gerekli zaman aralığını tahmin etmemizi sağlar [15].

Isısın malzeme içinde derinlemesine ilerlemesi için ısı dağılımının az olması gerekir. Isı dağılımının fazla olması ısısın yüzeyden hızla bir şekilde yok olmasına sebep olur. Bu durum ise işlem yapılan bölgede erime miktarını azaltır ve ısıdan etkilenen

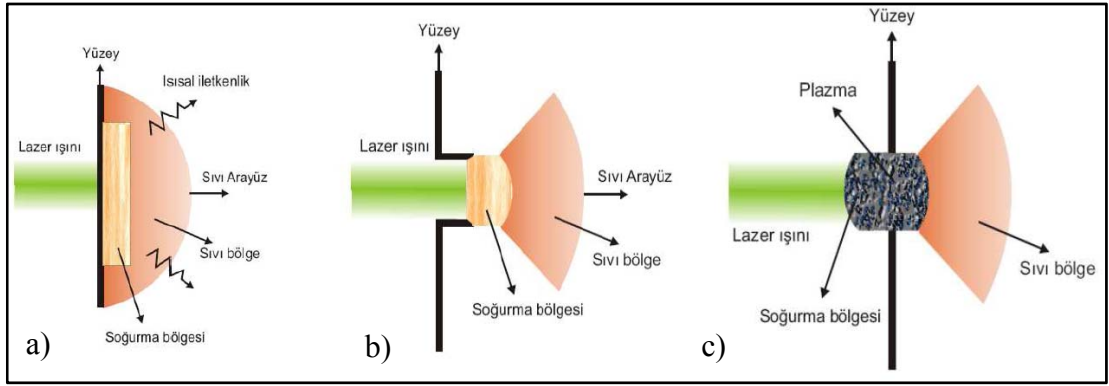
bölgenin de büyük olmasına neden olur ki istenilen bir durum değildir. Bundan dolayı farklı malzemeler için farklı lazer değişkenleri belirlemek gerekir [4, 18].

Bir malzeme lazer enerjisini soğurması sonucunda fiziksel durumu değişikliğe uğrar. Bu değişiklikler ısınma, erime ve buharlaşma olabilir. Bu fiziksel süreçleri Şekil 3.2’ deki gibi gösterebiliriz.



Şekil 3.2: Sıcaklık – Zaman değişim noktaları [15]

Şekil 3.2’ de görüldüğü gibi oda sıcaklığında bir malzemenin ısıtılarak buharlaşma sürecine ulaşıncaya kadar olan değişimlerin benzeri gibi malzemenin üzerine düşürülen lazer ışın malzeme tarafından soğurulur. Malzemenin üzerine ışının düşürüldüğü bölge için A noktasında iken bu bölge katı durumdadır. Zamanla gelen ışın bu bölgeyi ısıtır. Bu ısınma B noktasına kadar devam eder. B noktasında malzeme henüz eriyik haline gelmemiştir. Bu esnada bölge ısınmaya devam edecektir. Burada B den C aralığına kadarki bölümde katı bölge sıvıya dönüşecektir. Işıma devam ettiğinde ortam bir süre eriyik durumunda olacaktır. Burada C noktası malzeme için erime noktası olacaktır. Bir zaman sonra bölge daha fazla enerji soğurmaya devam ederek ısınacak ve C noktasından D noktasına kadar sıcaklık artışı olacaktır. D noktasında malzeme için buharlaşma sıcaklığına ulaşmış olacaktır. D noktasında E noktası aralığında bölge enerji soğurarak buharlaşma meydana gelirken sıcaklık sabit kalır. E noktasında bu bölge tamamen buharlaşma olacaktır. Bütün bu işlem çok kısa zaman aralığında olmaktadır.



Şekil 3.3: Yüksek şiddetli lazer atımı malzeme yüzeyine düşürüldüğünde gerçekleşen (a) erime, (b) buharlaşma ve (c) plazma oluşma fiziksel süreçlerinin şematik gösterimi [4]

Malzeme üzerine düşürülen lazer ışını ilk aşamada yüzeyde depolanır. Depolanan bu ısı enerjisi ısısal iletkenlik sayesinde malzeme içine nüfus eder. Şekil 3.2a' da şematik olarak betimlendiği gibi yüzey erime sıcaklığına ulaşıldığında malzeme üzerinde sıvı bir ara yüzey oluşur ve ısı malzeme içine doğru yayılmaya başlar. Işıma devam ettiğinde Şekil 3.3b' de betimlendiği gibi işlem bölgesinde buharlaşma olur ve delik oluşmaya başlar. Eğer ışıma yeterli kadar güçlü olursa buharlaşan eriyik malzeme içerisinde ışık geçirmez bir plazma veya iyonlaşmış gaz bulutu oluşmasına sebep olur. Bu plazma bulutu ışının geldiği yöne doğru büyüyebilir ve ışının ilerlemesine engel olur (Şekil 3.3c).

Malzeme üzerine düşürülen yüksek güçlü lazer demetinin soğurulması esnasında ısınma etkisi çok hızlı meydana gelebilir. Bu ise yüzeyin hızlı bir biçimde erime sıcaklığına ulaşmasını sebep olur. Kaynak işlemleri için istenilen durum eriyik olma durumudur. Diğer bir ifade ile kaynak işlemlerinde daha fazla erime derinliğine ulaşmak için yüzeyde buharlaşma olmaması istenilen bir durumdur. Buharlaşma, kaynak işlemi için istenmeyen bir durum olmasına rağmen delme ve kesme işlemleri için istenilen bir durumdur. Bir yüzeye yüksek enerjili bir lazer demeti gönderilirken yüzey hızlı bir şekilde buharlaşma sıcaklığına ulaşır; demet yüzeyden içeriye doğru buharlaştırarak bir delik oluşturur [4, 15].

Lazer ışını malzeme üzerine düşürüldüğünde buharlaşmadan önce ilk olarak erime meydana gelir. Buharlaşma başlangıcı çok hızlı olduğundan bu süre erime için yeterli değildir. Bundan dolayı yüksek şiddetli ışımalarda ($>10^6$ W), erime önemini kaybettiğinden baskın olan fiziksel süreç buharlaşmadır. Yüzey buharlaşma

sıcaklığına ulaştıktan sonra lazer enerji vermeye devam eder. Bu enerji buharlaşma ısısı için gerekli olup oluşan buhar malzemeden uzaklaşır. Sonunda hedef malzemenin içine doğru bir delik oluşur [4, 15, 19, 20]. Burada önemle vurgulanması gereken lazerle yapılan bu derinlemesine delik delme işlemi sınırlıdır. Sıradan bir küçük lazerle yapılan delme işlemi bir ya da birkaç milimetre deriliklere inebilir [15].

Diğer önemli bir etken ise buharlaşma sıcaklığının malzemeden malzemeye değişmesidir. İşlemlerde yüksek dereceli lazer ışımaları kullanıldığında ısısal iletimden kaynaklanan kayıplar oldukça azdır. Bu koşullarda oluşacak deliğin derinliği basit bir denklem yaklaşımıyla

$$D = Ft_a / L\rho A_s \quad (3.11)$$

şeklinde verilir. Burada t_a ; atım süresi, A_s ; odak alanı, ρ ; yoğunluk, F ; soğurulan ışımaya, L ; özel buharlaşma ısısıdır [4, 15].

Lazerle hedefte oluşturulan delikten dışarıya atılan malzemenin tamamı buhar halinde dışarı atılmaz. Bir kısmı da delikten dışa doğru oluşan buhar basıncı ile eriyik halinde atılır [4, 18].

Lazer ışımalarının yeterli kadar güçlü olduğunda buharlaşan eriyik malzeme içerisinde ışık geçirmez bir plazma veya iyonlaşmış gaz bulutu oluşmasına sebep olduğu yukarıda ifade edildi. Oluşan plazma veya iyonlaşmış gaz bulutu lazer demetini kısmen soğuracağından delme işlemi için istenen bir durum değildir.

Çok yüksek tepe gücüne sahip bir lazer ışını malzeme üzerine düşürüldüğünde malzeme yüzeyinde plazma oluşturur. Bu da bize buharlaşmayı sağlamak için yüksek enerjili lazer kullanma konusunda bize enerji sınırlaması yapmaktadır. Yani sürekli olarak enerjiyi artırmak iyi delik delme anlamına gelmemektedir. Eğer en uygun enerji kullanılarak delme işlemi yapılırsa lazer demeti ilerledikçe oluşan plazma zamanla genişleme gösterecek ve lazer ışını için saydam hale gelecektir. Bunun için en uygun değişkenleri (atım sayısı, enerji, dalga boyu vs.) kullanmak gerekir.

3.3 Lazer İle Malzeme Delme İşlemi

Gelişen teknoloji ile geliştirilen lazer sistemleri sayesinde endüstride özellikle hassas delme işlemleri için lazerlerin kullanımı artmaktadır [4]. Seramik, silikon ve polimer katmanları lazerle delme elektronik endüstrisinde oldukça geniş kullanılır. Elektro erozyon ile işleme (Electrical Discharge Machining - EMD) ve mekanik delme yöntemlerine göre lazerle delme yöntemiyle oldukça küçük ve hassas delikler delmek mümkündür. Tablo 3.1’ de bu yöntemlerin faydaları ve kusurları karşılaştırılmıştır [21].

Tablo 3. 1: Lazerle delik delme yönteminin karşılaştırılması [21]

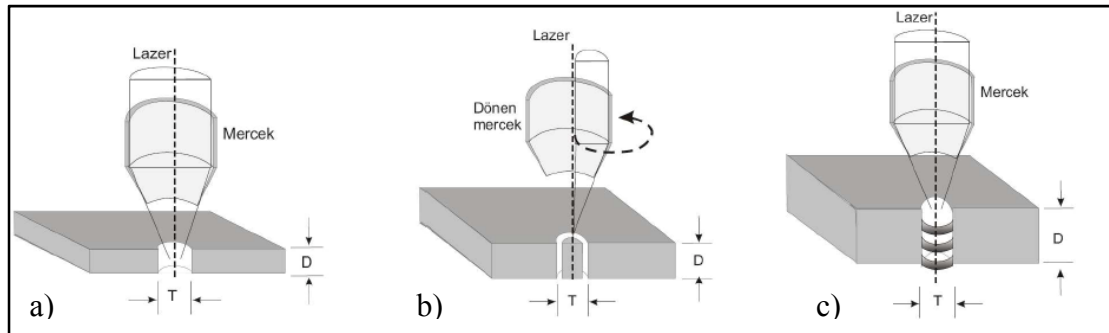
	EMD	Mekanik Delme	Lazerle Delme
Faydaları	Delik ucu düz, Büyük derinlik, Düşük donanım maliyeti,	Geniş delik çapı, Büyük derinlik, Düşük donanım maliyeti,	Yüksek iş/zaman oranı, Delikte aşınma ve çatlama yoktur, Uzaktan işlem, Düşük ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ), Çok çeşitli malzeme işleme, Düşük işlem masrafı
Kusurları	Düşük delme hızı, Uzun sistem kurulum zamanı, Yüksek işlem maliyeti, İşlem yapılan malzeme sayısı az	Delikte aşınma ve çatlama olur, Düşük iş/zaman oranı, Küçük delik delmek zor, İşlem yapılan malzeme sayısı az	Delik ucu sivriligi, Derinlik ve çap sınırlı, Delik girişinde tekrar katılma

Lazerle delmenin ana uygulama alanlarından biri uçak-jet motorlarında yanma hücrelerine ve türbinlere delik açmaktır. Delikler, soğuk bir hava akımını istenilen sıcaklıkta ya sıcak yakma gazları karışımıyla ya da alev tüpü ve türbin pervane yüzeylerine iletimini devam ettirmek için soğutma amaçlı kullanılır. Yakıt hücresi ve türbin genellikle ısı-dirençli alaşımlardan yapıldığı için mekanik delme yöntemleri hem pahalı hem de zaman alır. Bu yüzden havacılık imalatında lazerlerin kullanımı tercih nedenidir [16, 22, 23, 24]. Lazerle delme işlemi çok karmaşık bir işlemdir. Çünkü işlemde hem erime hem de buharlaşma olur. Bu fiziksel süreçler de ısı akışı,

gaz dinamiği ve plazma etkisi gibi etkenleri içerir [15, 16]. Delik delme için kullanılan lazerler kaynak için kullanılan lazerlerden biraz farklıdır. Delme ve kesme işlemlerinde kullanılan lazerlerin ısıma şiddeti daha fazla ve atım süreleri daha kısa olmalıdır [16].

Delme işleminde; metalik malzemeler için soğurmasına bağlı olarak yüksek güçlü lazerler (görünür bölge ve yakın kızılaltı bölgede ısıma yapan Nd:YAG, Nd:Glass, CO₂ ve Diyot lazerler) kullanılmakta polimer benzeri malzemeler için ise bu malzemeler ısıdan fazla etkilendiğinden dolayı UV bölgesinde ve uzak kızılaltı bölgesinde ısıma yapan (malzemede foto-kimyasal tepkime yapan) lazerler kullanılır (193 nm, 248 nm, 266 nm, 355 nm dalgaboyunda ısıma yapan lazerler) [16, 22, 23, 25].

Lazerle delme işleminde birkaç farklı teknik vardır. Bu teknikler istenilen deliğin boyutlarına göre değişmektedir. Bu teknikler: i) çok atımlı delme, ii) tek atımlı delme, iii) keserek delme olarak isimlendirilir. Çok atımlı delme tekniği, çok sayıda kısa süreli atımı hedef malzeme üzerine göndererek çapı 1 mm’ den küçük ve yaklaşık 20 mm derinliğinde delikler elde etmek için kullanılır. Tek atımlı delme tekniği, tek lazer atımını hedef malzeme üzerine gönderilerek çapı 1 mm ‘den küçük ve derinliği yaklaşık 3 mm olan delikler delmek için kullanılır. Bu iki teknikle boyut bakımından hassas delikler elde etmek mümkündür. Üçüncü teknik olan keserek delme tekniği, geniş çaplı delikler elde etmek için kullanılır [4, 24]. Bu teknik lazer sisteminin hareket kabiliyetine göre farklı çaplarda ve farklı geometrik şekillerde delme işlemi gerçekleştirmeye olanak sağlar. Şekil 3.4’ de bu tekniklerin şematik gösterimi verilmiştir.



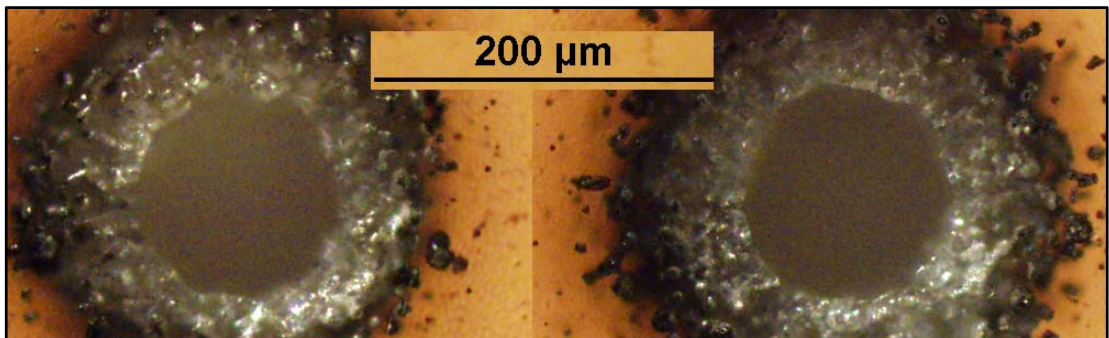
Şekil 3.4: Lazerle delme teknikleri: (a) tek atımlı, (b) keserek, (c) çok atımlı

Yüksek enerjili bir lazer demeti hedef malzeme üzerine düşürüldüğünde malzeme yüzeyi buharlaşma sıcaklığına ulaşır. Yüzey buharlaşma sıcaklığına ulaşıldıktan sonra lazer demeti devamlı olarak yüzeye gönderilir ise bu gelen enerji oluşmuş olan eriyik malzemeyi buharlaştırarak uzaklaştırmak için gerekli buharlaşma gizli ısını sağlar. Buharlaşma olayından dolayı malzemede bir derinlik oluşur. Bu derinlik

$$D_{mak} = \frac{(1-R)E}{A_s \rho [c_p (T_k - T_o) + L_b + L_e]} \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada E ; lazer enerjisi (J), c_p ; malzeme özısıısı (J/g), A_s ; odak alanı (cm²), ρ ; yoğunluk (g/cm³), L_e ; birim kütle başına erime gizli ısıısı (J/g), L_b ; birim kütle başına buharlaşma gizli ısıısı (J/g), $(1-R)$; soğurma katsayısı, R ; yansıtma katsayısı, T_k ; kaynama sıcaklığı, T_o ; ortamın sıcaklığıdır.

Pratik olarak, delik delme işleminde delik derinliğine etki eden birkaç etken vardır: yüzeyden yansıtılan enerji kaybı, plazmadan soğurulan enerji kaybı, ısısal iletkenlik kaybı. Bu etkenler delik boyutunun malzeme içine doğru ilerlemesini azaltır. Eriyik malzeme boşaltılırken artan delik derinliği için buharlaştırma işlemi tam olmaz. Dolayısıyla ilerleme yavaşlar ve durur. Lazerle delme işleminde dışarı atılan malzemenin tamamı buharlaştırılmaz. Delik yüzeyindeki eriyik malzeme sıcak kürecikler halinde dışarı atılabilir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: Bir PC polimer malzeme de lazerle delme işleminde dışarı atılan kürecikler.

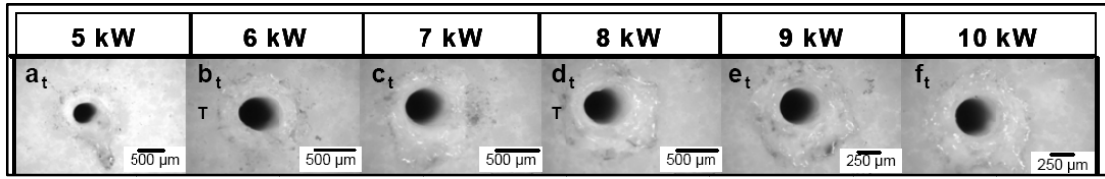
Hedef malzemede delik oluşmaya başlarken oluşan basınca sebep olan buhar kraterin çıkış ağzına doğru bir akış sağlar. Bu akış krater sınırları boyunca eriyik halinde

taşınabilir. Bu akış işlemi buharlaştırılmamış malzeme damlacıkları şeklinde kütlenin bir kısmı taşınır ve sonuçta eğer buharlaşmış malzemenin hepsi taşınırsa büyük bir kütle delikten taşınmış olur [15]. Özellikle sert malzemelerin delinmesi işleminde delik yüzeyi yakınlarında mikro çatlaklar oluşur [16].

Lazerle delme işlemi için demet kalitesi, dalga boyu, atım enerjisi, atım süresi, atım tekrarlama süresi (frekans) önemli değişkenlerdir [16, 21].

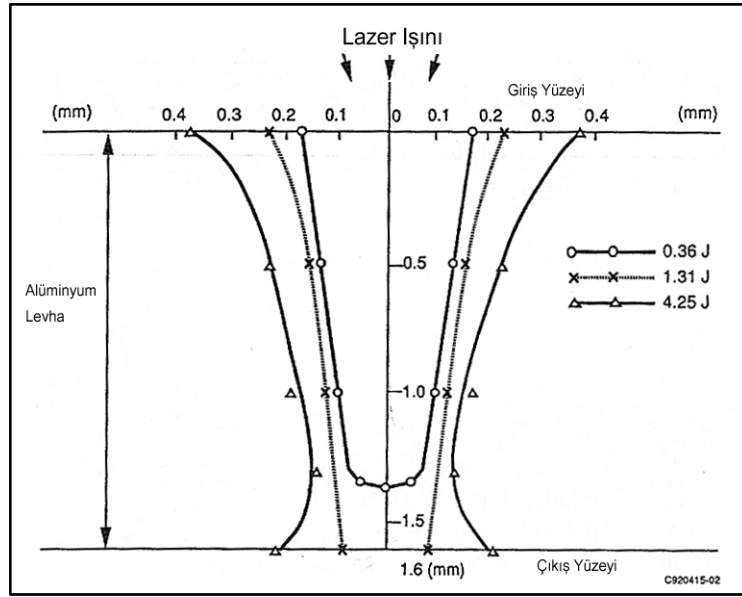
3.3.1 Enerjinin etkisi

Lazerle mikro delme işlemi için gerekli lazer gücü, işlem yapılacak malzemenin optik ve ısısal özellikleri incelenerek Bölüm 3.1.1 ve Bölüm 3.1.2’ de tartışılmıştı. Çalışma yüzeyine yeterli enerji uygulandığında sıcaklık kaynama noktasının ötesine ulaşacaktır. Bu durumda buharlaşma meydana gelir ve bir geri tepki basıncı oluşur. Bu basınç, etkileşim bölgesindeki eriyiği dışarı çıkarır ve sonuçta delik oluşur.



Şekil 3.6: Seramik malzeme delme işlemi. Atım süresi 2 ms [26]

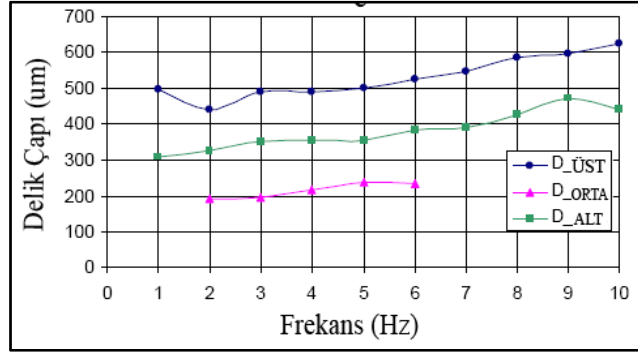
Delme işleminde lazer enerjisi arttıkça hem derinlik hem de delik çapı artar. Tipik bir lazerle delme işleminde artan enerjiye göre delik oluşumu Şekil 3.7’ de şematik olarak gösterilmiştir. Etkileşim sırasında enerji kaybının artmasından dolayı delik ucu sivrilmeye başlar [27]. Giriş kısmında delik çapı büyüktür, derinlik arttıkça çapı azalmaktadır. Atımlı lazerle çoklu atım yapılarak malzeme delinebilir. Lazerle delme işleminde gerekli lazer gücü, malzemenin ısı iletkenliği gibi değişkenleri içeren ısısal özelliklere ve yansıma soğurma gibi değişkenleri içeren optik özelliklerine göre seçilir.



Şekil 3.7: Atımlı yakut lazeri kullanılarak yapılan çalışmada farklı enerjilerde Alüminyum tabakada delik oluşumu [15].

3.3.2 Frekansın etkisi

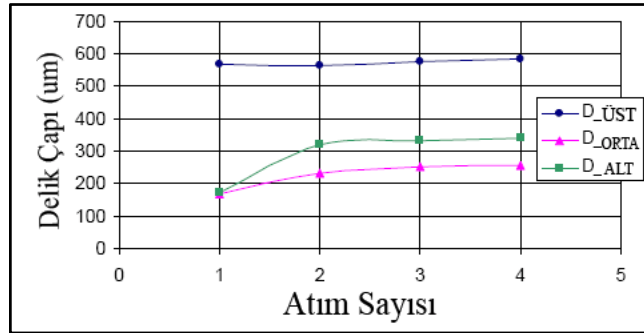
Lazerle delme işleminde atımlı lazerle kullanılarak yüksek verim elde edilir. Aynı bölgeye art arda atım gönderilerek yapılan bu işlemde frekansın etkisi önemlidir. Her bir atım esnasında eriyik ve malzeme arasındaki etkileşim zamanında aşınmalar meydana gelir. Eriyik çıkarım işlemi esnasında dışarı çıkarılan eriyik madde deliğin yan duvarlarına ilişik kalır. Her bir atım arasında tekrar katılma meydana gelir ve bu katılma atım frekansına bağlıdır. Atım frekansı artırıldığında daha az erimiş madde tekrar katılır ve daha düzgün delik girişleri elde edilir. Ayrıca yüksek atım frekansı ile daha düz delik yan duvarı oluşur. Çok yüksek frekanslarda duvarlar düzgün olmayabilir. Frekans çok yüksek olduğunda atımların malzemeye gelme aralıkları kısılacığından malzemeye gelen ilk atımın oluşturacağı eriyik ve buharlaşma, ikinci gelen atımın malzemeyle değil de gelen ilk atımın oluşturacağı eriyikle etkileşmesine sebep olur. Sonuçta yinede dışarı malzeme çıkarılacaktır ama duvar deliği bu etkileşmeden dolayı düzgün olmayacaktır [16]. Bu da delme işleminde frekansın belirli bir aralıkta tutulması gerektiğini gösterir.



Şekil 3.8: Frekansın delik çapına etkisi [16].

3.3.3 Atım sayısının etkisi

Atımlı delme işlemi, atımların belirli bir düzende hedefte aynı noktaya odaklama işlemi olup odaklandığı bölgeden eriyik çıkarmayla sonuçlanıp delik oluşturma işlemidir. Bu işlemde, doğrusal olmayan lazer madde etkileşimi niteliğine göre eriyik çıkarma oranı ve mekanizma değişkenlik çeşitliliğine bağlı olarak değişim görülür. Bu değişkenler, deliğin şeklini, lazer çıkışındaki düzensiz değişimi, plazma bulutundaki azalma ve saçılım ile demetin soğurulmasını içerir.



Şekil 3. 9: Atım sayısı delik çapı değişimi [16]

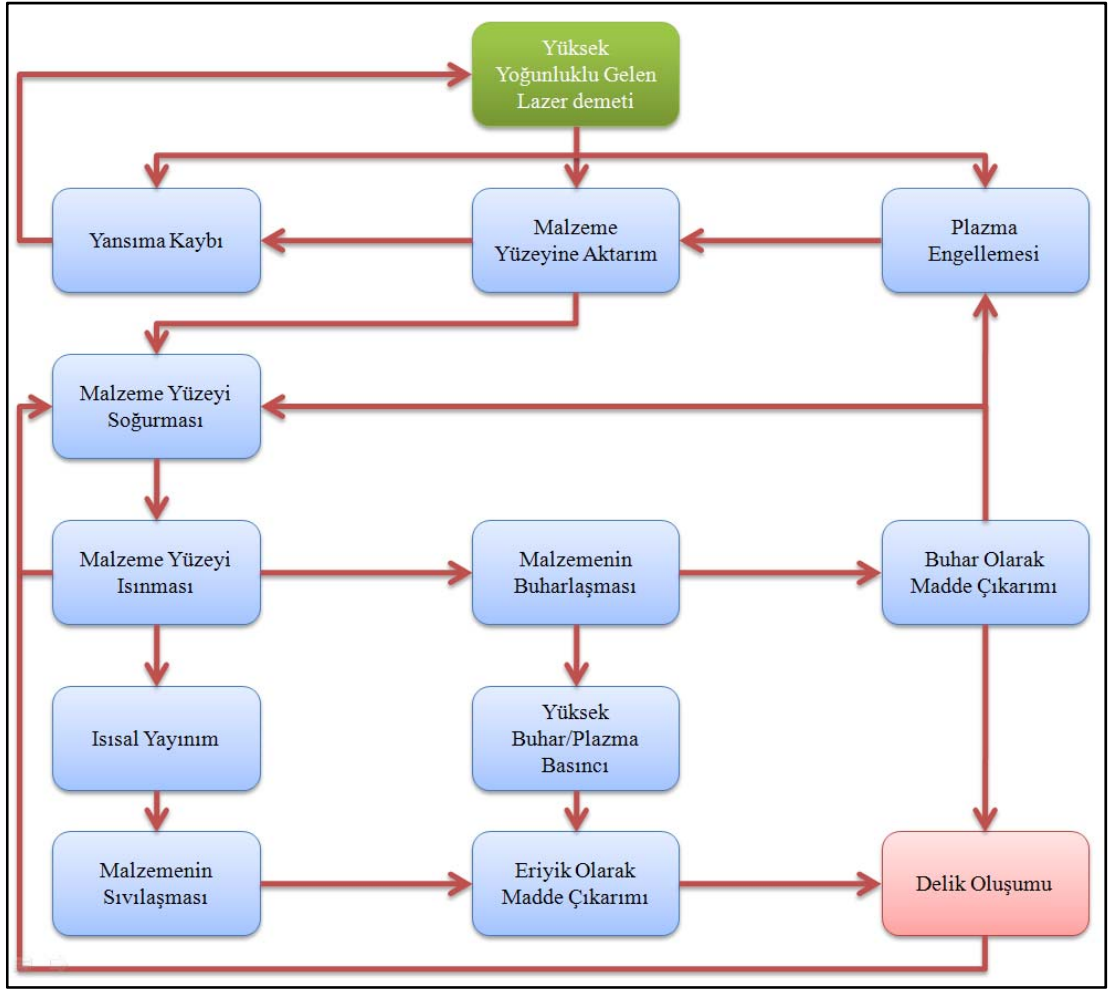
Lazer ile delme işleminde; atım süresi demetin malzeme ile etkileşmesinde deliğin kalitesi ve derinlik oranı bakımından çok önemli rol oynamaktadır. Örnek olarak metallerde, lazer enerjisi başlangıçta elektronlar tarafından soğurulur. Elektronların ısınması yaklaşık 100 femtosaniye civarındadır. Elektronlar ve fononlar arasındaki ısısal denge, elektron ve fononlar arasındaki etkileşme zamanından (0,5-50 pikosaniye) çok sonra gerçekleşir. Buradan anlaşılabileceği gibi atım süresi elektron fonon etkileşme zamanından kısa olan bir lazer ile işlem yapıldığında, ısı örgülere

aktarılmaz, bu nedenle malzemede erime veya ısısal zararlar görülmez. Ancak pratikte bu etkinin tam olarak gözlenmesi zordur. Kristal örgüler ısınırken buharlaşma başlar ve nanosaniye sürelerince devam eder. Malzeme onlarca nanosaniye eriyik halde kalır. Bundan dolayı çok kısa (ultrashort) atımlar (femtosaniye) kullanılırsa dahi ısısal işlem hala nanosaniye mertebelerindedir. Bundan dolayı erimiş katmanlar asla sıfır yapılamaz ancak çok ince malzemelerin işlenmesinde (mikron mertebelerinde) en aza indirilebilir [40].

3.3.4 Dalgaboyunun etkisi

Lazer ile malzeme işlemede, kısa dalgaboylu ve atım süreli lazerin kullanılması, foton-malzeme etkileşiminin yüzeyde gerçekleşmesine neden olur. Yüksek kaliteli küçük yapılar elde etmek ve küçük delikler açmak için, 100 ns veya daha küçük atım süreli lazerler kullanılmalıdır. Atım süresinde meydana gelen azalma lazerin tepe gücünün ($P_t = E/\tau$) artmasına neden olur. Lazerle delme işleminde baskın fiziksel işlem, ısısal ve foto-kimyasal işlemlerdir. Bunun için lazer ışınının dalgaboyu önemli bir parametredir. Daha kısa dalgaboyları (UV) daha yüksek foton enerjisine sahiptir ve foto-kimyasal tepkimeye sebep olur. Daha uzun dalgaboyları (IR) daha küçük foton enerjisine sahiptir ve ısısal tepkimeye sebep olur. [25].

Kısaca özetlemek gerekirse lazerle delme işlemi süreçleri Şekil 3.10' daki gibi bir şema halinde gösterilebilir.



Şekil 3.10: Lazerle delme işlemi süreçleri [16]

3.4 Polimerler

Bu tez çalışmasında kullanılan malzemeler polimerik malzeme olduğundan polimerler hakkında genel bir bilgi verilecektir.

Polimer molekülleri bileşim ve yapı bakımından birbirlerinin aynı olan çok sayıda birimin kendi aralarında kovalent bağlarla bağlanması ile meydana gelirler. Polimerlere bazen “yüksek moleküllü bileşik” ya da “makromoleküller” de denir. “Poli” Latince bir sözcük olup “çok sayıda” anlamına gelir. Polimer moleküllerini oluşturmak üzere bir araya gelen ve birbirleri ile kimyasal bağlarla bağlanan küçük moleküllere “monomer” denir. Polimerin yapı birimleri monomere eşit ya da hemen hemen eşittir. Yüksek (saf) polimerler kovalent bir yapı gösterirler.

Bir polimer tek bir monomer biriminin tekrarlanmasından oluşuyorsa buna “homopolimer” denir. Örnek olarak, etilenden elde edilen polietilen ve streden elde edilen polistren verilebilir. İki ya da daha fazla monomer içeren polimerler ise kopolimer olarak adlandırılırlar. Kopolimerler genellikle farklı monomerlerin düzensiz birleşmesinden oluşarak rastgele (random) kopolimeri oluştururlar. Bununla beraber, alternatif, blok, graft ve steroblok kopolimerler bu kuralın dışındadır. Alternatif kopolimerde monomer birimleri birbiri ardına gelir. Blok kopolimer farklı homopolimerlerin uzun segmentlerini içerir. Graft kopolimer ya da diğer bir deyimle aşı kopolimer ise asıl mevcut bir polimer zinciri üzerinde bir dallanma olarak ikinci bir monomer içerir.

Uzun zincirler halinde bulunan lineer ya da dallanmış zincirlerden oluşan polimer sistemlerine aynı zamanda termoplastik adı da verilmektedir. Termoplastikler, molekül yapılarında çapraz bağ içermediklerinden dolayı ısı ve basınç altında plastik özelliklerini koruyan polimer yapılardır. Bu maddelere ısı ve basınç altında defalarca şekil vermek mümkündür. Bu maddelere örnek olarak AYPE, YYPE, PVC, PP gösterilebilir. Yüksek oranda çapraz bağ içeren sistemler ise termoset olarak tanımlanır. Bu maddeler ise bir defa ısı-basınç altında şekillendikten sonra tekrar yeniden şekillenmeyen polimer yapılardır. Isı ve basınç muamelesinden sonra katı, sert ve plastik olmayan bir madde elde edilir. Bu tip maddelere de kauçuk örneği verilebilir [29].

3.4.1 Polimerlerin özellikleri

3.4.1.1 Molekül ağırlıkları

Polimerlerin fiziksel özellikleri molekül ağırlığı ile ilişkilidir. Bu nedenle polimerlerden beklenen fiziksel özellikleri gösterebilmeleri için belirli bir molekül ağırlığına sahip olmaları gerekir.

Genellikle molekül ağırlığının artması ile yapıda moleküller arası çekim artmakta ve bu da polimerin mekanik ve ısı özelliklerini etkilemektedir. Polimerlerin molekül

ağırlıkları, jel geçirgenlik kromatografisi, viskozimetrik ölçüm, ozmotik ve basınç ışık saçılması gibi yöntemlerle belirlenebilir.

3.4.1.2 Polimerlerin sınıflandırılması

Polimerleri inceleyebilmek için sınıflandırılmaları gerekir. Polimerler yapılarına göre sınıflandırılabilirler. Amaca uygun olarak aşağıdaki sınıflandırmalar yapılmıştır.

- a. Molekül ağırlıklarına göre (oligomer, makromolekül)
- b. Doğada bulunup, bulunmamasına göre (doğal, yapay)
- c. Organik ya da anorganik olmalarına göre
- d. Isıya karşı gösterdikleri davranışa göre
- e. Zincirin kimyasal ve fiziksel yapısına göre (Düz, dallanmış, çapraz bağlı, kristal, amorf polimerler)
- f. Zincir yapısına göre (homopolimer, kopolimer)
- g. Sentezlenme şekillerine göre

Polimerleşme reaksiyonları esnasında pek çok monomer, diğer monomerlerle ya da ortamda daha önce tepkime vermiş ve böylece belli bir moleküler ağırlığa ulaşmış, bir molekül zinciri ile tepkime verebilir. Oluşan zincirlerin büyüklükleri, türlerin moleküler yapılarından, tepkime verme yollarına ve sentez şekillerine kadar, pek çok etkene bağlıdır. Eğer polimer zinciri yeterince büyümemişse, bu tip polimerler oligomer olarak adlandırılır.

Doğal makromoleküller olmaksızın doğadaki hayatın devamı düşünülemez. Çünkü hayatın kendisini oluşturan temel elemanlar bu moleküllerdir. En iyi bilinen örneklerden bazıları proteinler, selüloz, keratin gibi doğal makromoleküllerdir.

Her gün gelişen yeni polimer sentez yöntemleri sayesinde elde edilmiş binlerce polimere her gün yenileri ilave edilmektedir. Günlük hayatın hemen her alanında rastlanan polimerik malzemeler, hayatın vazgeçilmez parçaları olmuşlardır. Polimerik malzemelerin bu kadar geniş kullanım alanlarına sahip olmalarının nedeni, yapısal özelliklerinin istenildiği gibi ayarlanabilir olmasından ve ekonomik olarak

elde edilebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Yapısal özelliklerinin istenildiği gibi ayarlanabilir olması, monomerlerin kendi kendileriyle ve diğer monomerlerle bağlanmalarında, bağlanma şekillerinin ve bağlanma miktarlarının fazlalığının bir sonucudur. Ayrıca istenilen fonksiyonlara sahip polimerler de uygun fonksiyonel gruplu monomerler kullanılarak kolayca hazırlanabilir.

Anorganik polimerlerde esas zincir karbona dayalı yapıya sahip değildir ve genellikle organik polimerlere kıyasla daha fazla ısıya dayanıklı ve daha serttirler. Termoplastik bir malzeme sıcaklık artışı ile eriyerek şeklini değiştirebilir ve böylece kalıplara dökülebilmesi mümkün olur. Oysa yüksek oranda çapraz bağ içeren bir yapının sıcaklık artışı ile böyle bir değişim geçirmesi, zincirlerin hareketli olmayışı nedeniyle, zordur ve sıcaklığın artışı bu tür malzemelerin erimesine değil, malzemenin parçalanmasına neden olur. Ayrıca polimerler lineer, dallanmış ve ağ olarak da tanımlanırlar. Lineer polimerde hiçbir dallanma yoktur (A). Graft Kopolimerler dallanmış polimerlerin bir örneğidir (B). Ağ (Network) polimerler, difonksiyonlu monomerler yerine, polifonksiyonlu monomerler kullanıldığında meydana gelirler. Ağ polimerler ayrıca çapraz bağlı polimerleri de kapsarlar (C). Çünkü çapraz bağlanmayla polimer zincirleri hareketliliklerini kaybederler. Bu nedenle erimeyecekleri ya da akmayacakları için kalıpla da şekillendirilemezler. Yani termosetting polimerler grubuna girerler [29].

BÖLÜM 4. KARBON FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN Nd:YAG LAZER İLE DELİNMESİ

Polimer matrisli seramik ve metal parçacık takviyeli kompozitlerin pek çok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu malzemelerin yüzeylerinin işlenmesinde, üzerlerine deliklerin açılmasında lazer kullanılmaktadır. Lazer çok kısa sürede odaklanmış bir enerjiyi malzemeye transfer etmesi ile termal bozunmaları engellemesi ve ısıdan etkilenen bölgenin az olması nedeniyle tercih edilmektedir [30]. Metal ve seramik parçacık takviyeli kompozitlerde polimer düşük sıcaklıkta eriyen bağlayıcı (binding) malzemesi olarak kullanılır. Malzemelerin lazer yardımıyla 3 boyutlu olarak işlenmesi son derece kolay ve tercih edilen bir yöntemdir. Burada mekanizma lazer enerjisinin metal parçacıklarca soğurulması ve ısı iletiminin parçacık tarafından yapılıp parçacık-polimer ara yüzeyinde polimerin buharlaşması ve parçacık yüzeyinden ayrılması şeklinde gerçekleşir. İşlem sırasında inert gaz ortamı kullanılır. Polimerin yok edilmesi sonrası ana malzeme tarafından tutulmayan metal parçacık yapıdan ayrılır ve bu prensiple malzeme işlenmiş olur [31].

4.1 Polimer Kompozitlerin Delinmesinde Kullanılan Deneysel Düzenek

Polimer kompozit malzemeleri delme işleminde Deneysel çalışmalarda GSI Lumonics Şirketi tarafından üretilen atımlı JK 760 TR Nd:YAG lazeri kullanıldı. Yüksek demet kalitesine sahip bu lazer tüm metaller için kesme, delme, kaynak işlemlerini yapabilecek kabiliyettedir. Bu lazer yüksek frekanslarda dahi atım şeklinde değişiklik yapma olanağı vererek zamana bağlı ısı aktarımını da kontrol edilebilir kılar. Kompozitlerin delme işlemleri CNC kabin içinde yapılmıştır. Kullanılan Nd:YAG lazerin atım süresi 0,3 ms ile 50 ms arasında değiştirilebilmekte ve maksimum 500 Hz' lik tekrarlama oranına sahiptir. Maksimum ortalama gücü 600 W ve maksimum tepe gücü 10 kW olup 1064 nm dalga boyunda ışımaya yapmaktadır.

Lazer ışını rezonatörden çapı 600 µm olan fiber optik kabloyla odaklama sistemine gönderilmektedir. Lazer ışını, 160 mm' lik plano-konveks mercek ile kompozit plaka yüzeyine odaklanmıştır. Malzeme üzerine düşen minimum ışın çapı 0,4 mm olarak ölçülmüştür.

4.2 Polimer Kompozit Malzemenin ve Deney Sisteminin İşlem İçin Hazırlanması

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesi kesilmeleri diğer konvansiyonel malzemelerden farklıdır. Hem fiber hem de matris malzemelerinin özellikleri kesme davranışını yakından etkiler. Örneğin cam fiber takviyeli epoksinin kesilmesinde, klasik takımlar yumuşak epoksi ile sert cam fiberi işlemek zorunda kalırlar. Temas etmeden lazerle kesme bu anlamda önemli avantajlar sağlar. Toz ve gürültüyü azaltır. Plastik deformasyonlar, delaminasyonlar ve ısı oluşumu azalır. Odaklanmış lazer ışını malzemenin erimesi ve buharlaşması sonrası uzaklaşmasını sağlar, matris malzemesi ise genelde kimyasal bozunma ile azalır. Lazer ile kesme ısıl bir olaydır, yansıma, soğurma, ısı iletimi bu kesme miktarını etkiler. Lazer ışımalarının dalga boyu, yüzey pürüzlülüğü, oksitlenme miktarı, sıcaklık, malzemenin optik ve termokimyasal özelliklerine bağlıdır. Nd-YAG lazerler 7-10 kW tepe enerjisine ve yaklaşık 4000 W ortalama enerjiye sahiptir. Lazerin sürekli şekilde değil, darbeli “atım” şekilde çalışması malzemenin soğutulabilmesine imkân verir. Lazerle kesme su jeti ve diğer konvansiyonel yöntemlerden daha uygundur. 3 boyutlu şekillerin minimum talaş oluşumu ile oluşturulmasını sağlar. Minimum devreye alma zamanı olması, kesme takımı aşınmasının olmaması, termal çarpılmaların olmaması, keskin kenarlı şekillerin oluşturulmasının kolay olması önemli avantajlarıdır.

Polimer kompozitlerde fiberlerin buharlaşması için harcanacak enerji matrinden çok daha fazladır. Karbon fiberlerin kesilmesinde dikkat edilmesi gereken husus bu malzemenin ısıyı iyi iletmeleri ve üzerlerinde oluşan ısı etkisini yakın bölgelere taşıması ihtimallerinin yüksek olmasıdır. Dolayısı ile daha hassas bir odaklama ve atım parametrelerinin optimize edilerek kesme yapılmasının daha verimli olacağı açıktır. Kesme sırasında oluşan ısı iletim yolu ile diğer bölgelere iletilir. CO₂

lazerlerinin kullanılması halinde ise güç sürekli aktarıldığından fiberlerin kesilmesi için geçen zamanda ısı yayılımı olmakta ve bu arada daha fazla matris erimektedir [32]. Özetle karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerde Nd-YAG lazerleri önerilmektedir.

Atımlı Nd-YAG lazerlerinin kullanılması ile karbon fiber takviyeli kompozitler kolay bir şekilde kesilebilmektedirler. Ortamdaki nem miktarı, sıcaklık, ortamdaki gazın tipi, basıncı, nozul tasarımı, odak uzaklığı, kesme hızı, atım enerjisi, atım süresi, atım tekrar sayısı ve koruyucu gaz basıncının kesme parametrelerine etkisi bilinmektedir. Aynı zamanda Fiberlerin hacimsel oranları ve yerleştirilme şekilleri de (uyum) önemli bir etkidir [33].

Yüksek derinlik/genişlik oranı yüksek deliklerin delinebilmesi son derece önemlidir [37]. Özellikle ışının malzeme içerisine girdiği yüzeyde çap değeri belli bir değerde iken artan kompozit panelin kalınlığı ve içerdeki fiberlerin yönlenmeleri vb. parametreler neticesi ile diğer yüzeyde açılan deliğin çapı değişmektedir. Kesme çalışmalarında koruyucu gaz olarak argon, helyum ve azot gazları kullanılabilmektedir [34].

Kompozit panelin delinmesi sırasında giriş deliği geniş, çıkış deliği ise küçüktür. Tek atımlı ve çok atımlı delme işlemi malzeme yüzeyinde farklı etkiler yapmaktadır. Malzeme yüzeyinde matrisin yanması ve zarar görmesi söz konusu olmaktadır. Kompozitten yapılan uçak kanatlarında mikro deliklerin açılması yüzeyde laminar sınır akış (türbülanslı akış yerine) sağladığından tercih edilmektedir [35].

Lazerin güç yoğunluğu, dalga boyu, ışığın polarizasyonu, etkileşim zamanı, malzemenin erime ve buharlaşma sıcaklığı, ısı iletkenlik, ısı kapasite, buharlaşma ısı ve ısı difüzyonu değerleri polimer kompozitin kesilmesi ile ilgili önemli parametrelerdir [36]

Polimer kompozitlerde en önemli dikkat edilen ve kontrol altında tutulmaya çalışılan faktör ısıdan etkilenen bölgedir. Morfolojik değişimler, ara yüzey hasarları, matris

malzemesindeki fiziksel ve kimyasal değişimler polimer kompozitlerin mekanik ve fiziksel performanslarını yakından etkiler.

Polimer kompozitlerin başka malzemelerle özellikle adhezhonla birleştirilmelerinde yüzey modifikasyonları önem kazanmaktadır. Lazer ile polimer esaslı malzemelerin yüzeylerinin işlenmesi de literatürde son derece geniş olarak işlenmiş bir konudur [38].

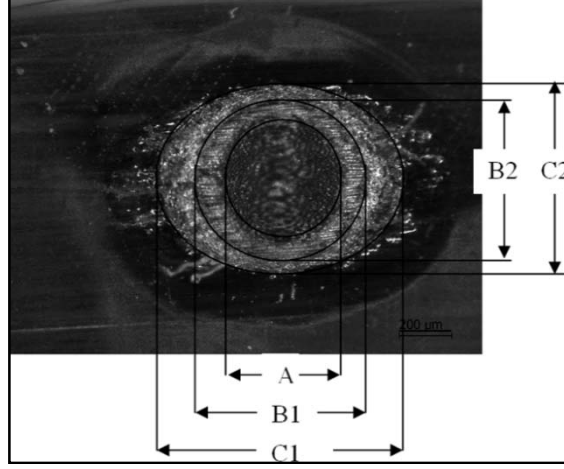
Literatürde de belirtildiği gibi polimer kompozitlerin üzerlerine delik delme, kesme ve yüzey işleme yapılması pek çok nedenle gerekmektedir. Örneğin bir uçakta gövdeye bir sensör yerleştirmek, kablo geçirmek, perçin ve civata bağlantısı için delik açmak ve benzeri pek çok nedenle çok fazla sayıda delik delme ve kesme yapılmaktadır. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerde şu ana kadar literatürde açılan deliklerin derinlik/genişlik değerleri yeterince yüksek değildir. Diğer yandan tam eksende delikler delinememekte ve deliğin açıldığı panel yüzeyindeki çapı ile panelin diğer yüzeyindeki çapı arasında farklılıklar söz konusu olmaktadır. Matris malzemesi lazerden kaynaklanan parametreler sonucu yanmakta ve aynı şekilde oluşan ısının transferi sonucu morfolojik değişimler ve hasarlar meydana gelmektedir.

Çalışmanın bu kısmında, yukarıda söz edilen dezavantajları minimize edip, lazer atım sayısı ve frekansı gibi lazer ile ilgili tüm parametreleri optimize edip, minimum ısıdan etkilenen bölgeye sahip, daha yüksek derinlik/genişlik oranlı deliği daha kontrollü bir şekilde odaklayarak delmek amaçlanmaktadır.

4.3 Polimer Kompozit Malzemenin Nd:YAG Lazer İle Delinmesi

Tek yönlü karbon fiber takviyeli Polyetherimide (PEI) Kompozitler TenCate Advanced Composites (Nijverdal/Netherlands) şirketinden sıcak preslenmiş plakalar şeklinde alınmıştır. Hacimsel fiber oranı %60' dır. Plakalar her biri 0,14 mm kalınlığındaki 14 kattan meydana gelmektedir ve plakaların yüzeyce yoğunluğu 222 g/m² dir. Bu ürünün ticari kodu CD5150' dir.

Deneyin ilk kısmında, tek atım, farklı enerjilerde malzeme üzerine gönderilmiştir ve malzeme üzerinde Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi delik (veya kavite) oluşmuştur.

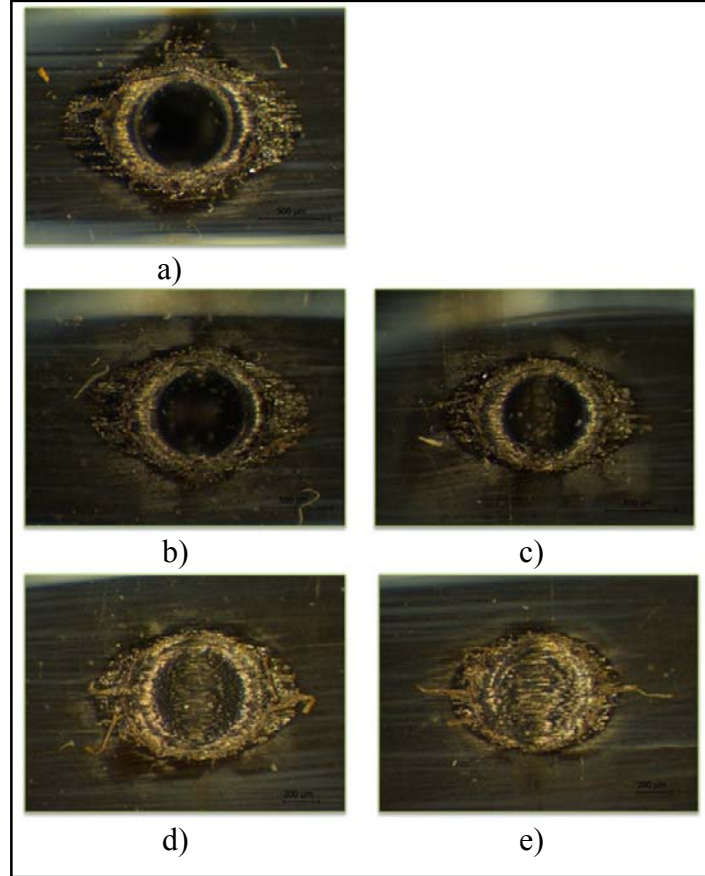


Şekil 4.1: Delik, Isıdan Etkilenen Bölgenin (HAZ) ve saçılma bölgesinin boyutları. Delik çapı “A” ile gösterilmiştir. HAZ’ ın şekli eliptik’tir. Maksimum HAZ elipsin ana eksenidir ve “B1” ile gösterilmiştir. Minimum HAZ elipsin ikincil eksenidir ve “B2” ile gösterilmiştir. Saçılma bölgesinin şekli de eliptiktir. “C1” elipsin ana eksenini “C2” ise ikincil eksenini göstermektedir.

Delik etrafında büyük miktarda saçılmış malzeme gözlenmiştir. Malzeme üzerinde oluşan delik dairesel (Şekil 4.1’ de “A” ile gösterilmiştir) olmasına rağmen ısıdan etkilenen bölge (HAZ-Heat Affected Zone) dairesel oluşmamıştır. Yönlendirilmiş fiberler ısıyı fiberlerin yönünde dağıttığı için HAZ elips şeklinde oluşmuştur. HAZ bölgesini gösteren elipsin ana eksenini maksimum HAZ (B1) olarak, ikincil eksenini de minimum HAZ (B2) olarak tablolarda gösterilmektedir. Bu gösterim şekli saçılma bölgesi için de aynı şekilde kullanılmıştır. Saçılma bölgesini gösteren elipsin ana eksenini (C1) olarak, ikincil eksenini de (C2) olarak tablolarda gösterilmektedir.

İlk olarak 3,5 J enerjili, 2 ms atım süreli tek atım malzeme üzerine gönderilmiştir (Şekil 4.2 (a)). Şekil 4.2’ de görüldüğü gibi, matris malzemesi, lazer enerjisi ile buharlaştığından, kompozit malzeme üzerindeki deliklerin etrafında oluşan HAZ bölgesinde sadece takviye fiberler görülmektedir. Saçılan malzemenin miktarını azaltmak için lazer atım süresi 2 ms’ de sabit tutularak, atım enerjisi 1,7 J’ e düşürüldüğünde, Şekil 4.2 (b)’ de görüldüğü gibi delik derinliği ve çapı azalmıştır. Enerji 0,7 J’ e düşürüldüğünde Şekil 4.2 (c)’ de görüldüğü gibi sadece küçük çaplı küçük bir kavite oluşmuş ve tam bir deliğin oluşmadığı gözlenmiştir. Aynı zamanda HAZ ve saçılma bölgelerinin de boyutlarında azalma görülmektedir. Lazer atım

enerjisi 0,3 J ve 0,1 J' e düşürüldüğünde, kavitenin çapında önemli bir değişme olmadığı gözlenmekle beraber HAZ ve saçılma bilgilerinin boyutlarında azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.2 (d) ve Şekil 4.2 (e)). Lazer enerjisinin delik çapı, HAZ ve saçılma bölgesi boyutları üzerine etkisi Tablo 4.1' de özetlenmiştir.

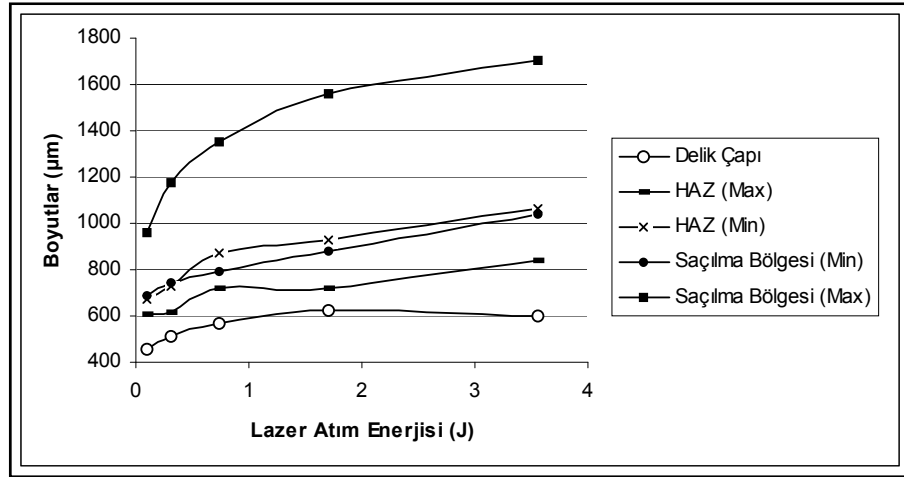


Şekil 4.2: HAZ ve Saçılma Bölgesinin uygulanan lazer enerjisi ile değişimi

Tablo 4.1: Uygulanan lazer enerjisi ve delik çapları

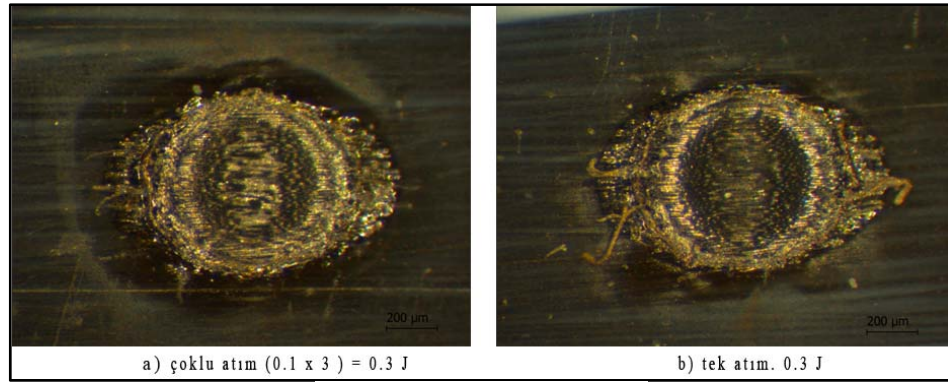
	Enerji (J)	Delik/Kavite Çapı (μm)	HAZ (Min), μm	HAZ (Mak), μm	Saçılma Bölgesi (Min), μm	Saçılma Bölgesi (Mak), μm
Şekil 4.2 (a)	3,5	598,87	841,81	1062,15	1039,55	1703,39
Şekil 4.2 (b)	1,7	627,12	717,51	926,55	878,53	1562,15
Şekil 4.2 (c)	0,7	564,97	717,51	875,71	793,79	1355,93
Şekil 4.2 (d)	0,3	510,34	616,09	724,14	740,23	1179,31
Şekil 4.2 (e)	0,1	459,77	611,49	671,26	689,66	956,32

Oluşan deliğin, HAZ' ın ve saçılma bölgesinin boyutları, lazer atım enerjisinin fonksiyonu olarak Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Lazer atım enerjisinin delik, HAZ ve saçılma bölgelerinin boyutlarına olan etkisi

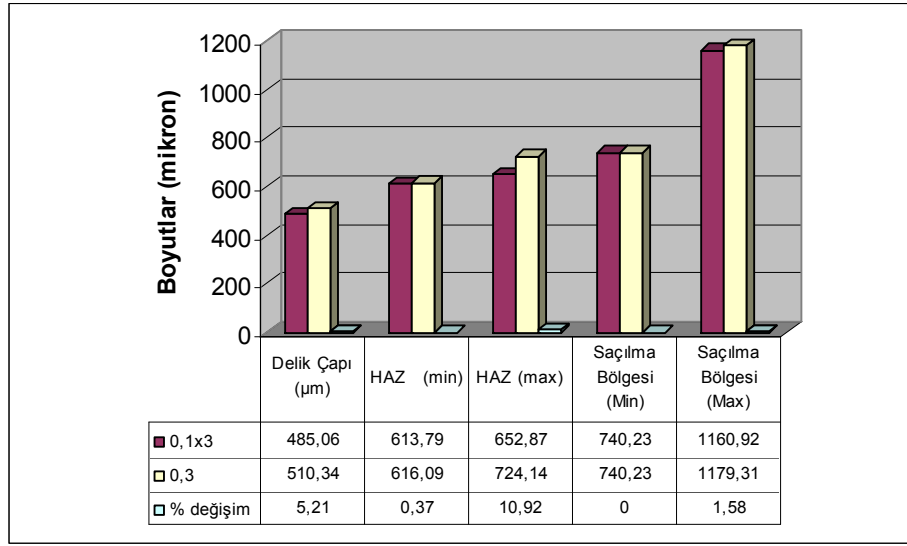
Deneyin ikinci kısmında, 0,1 J enerjili üç atım arka arkaya malzeme üzerine gönderilmiştir. Oluşan deliğin boyutları Şekil 4.4' de gösterilmiştir. Bu sonuçlar Şekil 4.2 (d) ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.4 (a)' daki delik boyutları ile Şekil 4.4 (b)' deki (Şekil 4.4 (b), Şekil 4.2 (d) ile aynıdır) delik boyutlarının farklı olduğu gözlenmiştir. Bu farklılıklar Tablo 4.2 ve Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Çoklu atım etkisi

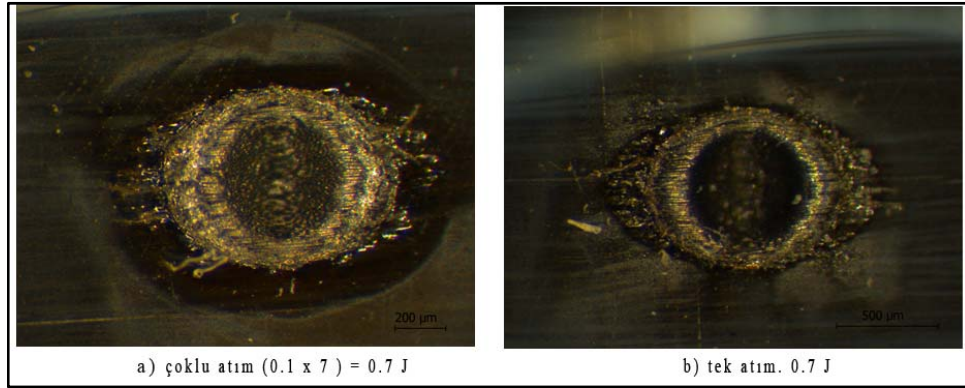
Tablo 4.2: 0.31 J enerjili tek atım etkisi ile 3 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark

	Enerji (J)	Kavite Çapı (µm)	HAZ (Min), µm	HAZ (Mak), µm	Saçılma Bölgesi (Min), µm	Saçılma Bölgesi (Mak), µm
Şekil 4.4 (a)	0,1x3 = 0,3	485,06	613,79	652,87	740,23	1160,92
Şekil 4.4 (b)	0,3	510,34	616,09	724,14	740,23	1179,31
	% değişim	5,21	0,37	10,92	0,00	1,58



Şekil 4.5: Tablo 4.2' deki verilerin karşılaştırılması

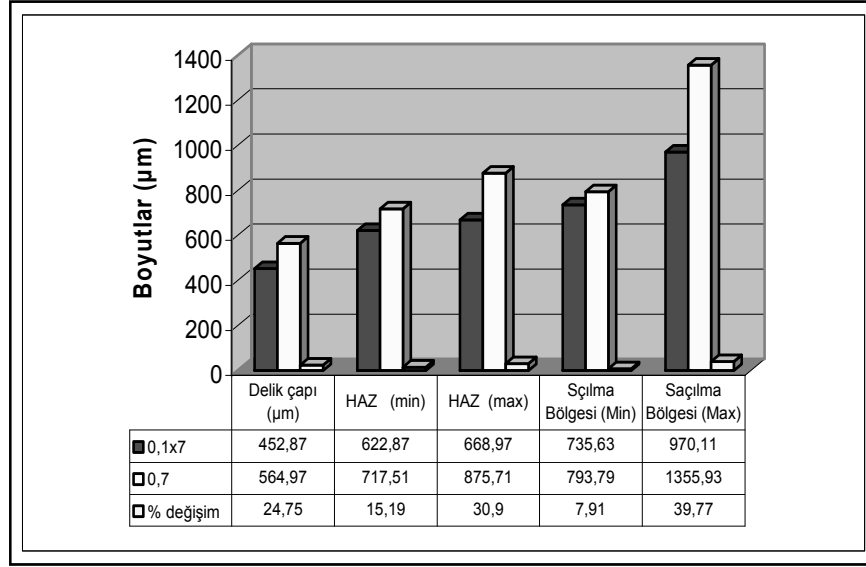
Büyük enerjili bir atım ile toplamda aynı enerjiye sahip düşük enerjili birkaç atımın etkileri arasındaki farkı görmek için, daha önce denemesi yapılan 0,7 J enerjili atım yerine 0,1 J enerjili 7 atım malzeme üzerine gönderilmiştir. Şekil 4.6' da görüldüğü gibi elde edilen kavitenin boyutları atma olmuştur. Bu farklılıklar Tablo 4.3 ve Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Çoklu atım etkisi

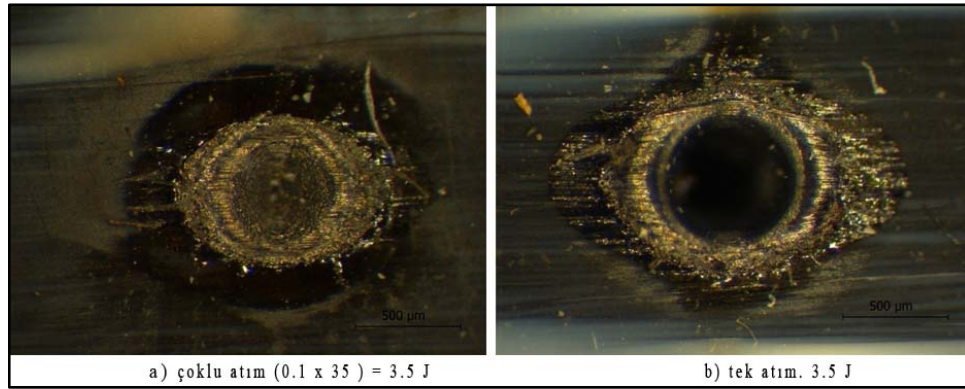
Tablo 4.3: 0.7 J enerjili tek atım etkisi ile 7 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark

	Enerji (J)	Kavite Çapı (µm)	HAZ (Min), µm	HAZ (Mak), µm	Saçılma Bölgesi (Min), µm	Saçılma Bölgesi (Mak), µm
Şekil 4.6 (a)	0,1x7	452,87	622,87	668,97	735,63	970,11
Şekil 4.6 (b)	0,7	564,97	717,51	875,71	793,79	1355,93
	% değişim	24,75	15,19	30,90	7,91	39,77



Şekil 4.7: Tablo 4.3' deki verilerin karşılaştırılması

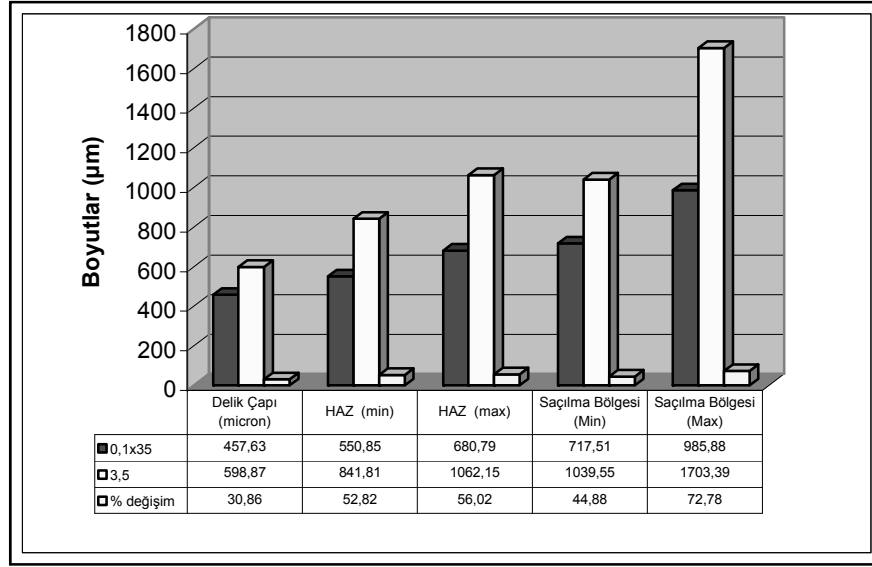
3,5 J enerjili tek bir atım yerine 0,1 J enerjili 35 atım malzeme üzerine gönderildiğinde, elde edilen kaviteden (Şekil 4.8) görüldüğü gibi kavite boyutlarında, daha önce elde edilen yüzde değişimler artmıştır. Bu farklar Tablo 4.4 ve Şekil 4.9' da gösterilmiştir.



Şekil 4.8: Çoklu atım etkisi

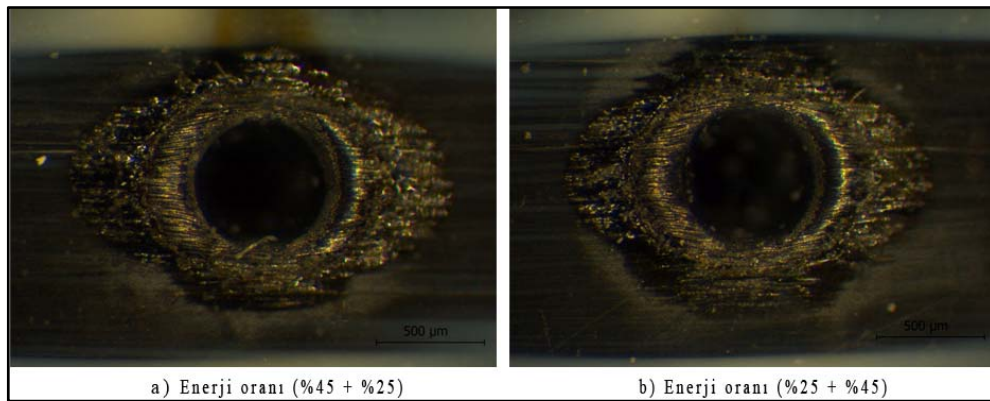
Tablo 4.4: 3.5 J enerjili tek atım etkisi ile 35 tane 0.1 J enerjili atımın etkisi arasındaki fark

	Enerji (J)	Delik/Kavite Çapı (µm)	HAZ (Min), µm	HAZ (Mak), µm	Sıcılma Bölgesi (Min), µm	Sıcılma Bölgesi (Mak), µm
Şekil 4.8 (a)	0,1x35	457,63	550,85	680,79	717,51	985,88
Şekil 4.8 (b)	3,5	598,87	841,81	1062,15	1039,55	1703,39
	% değişim	30,86	52,82	56,02	44,88	72,78



Şekil 4.9: Tablo 4.4' deki verilerin karşılaştırılması

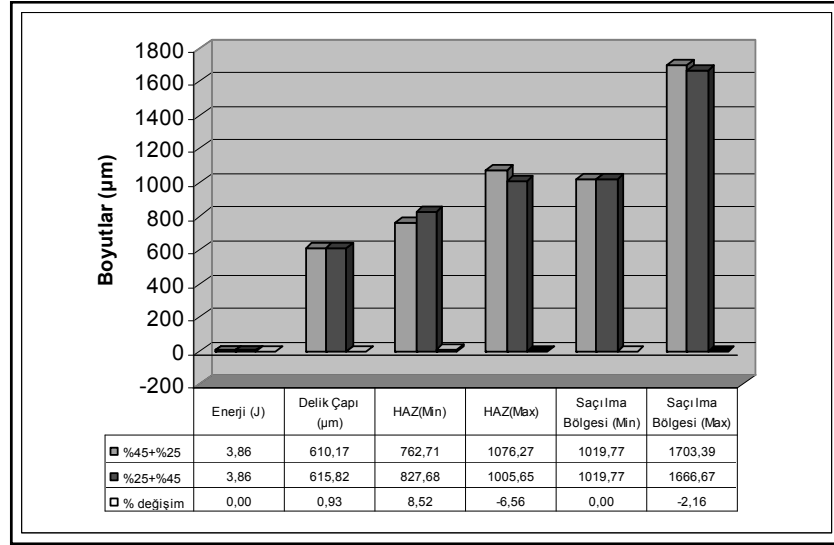
Deneyin üçüncü kısmında, atım enerji oranının delik şekli üzerine etkisini görmek için, enerji oranları değiştirilmiştir. İlk olarak dikdörtgen şeklindeki tek bir atım, toplamda aynı enerjili, farklı enerji oranlarına sahip arka arkaya iki atım şeklinde (%45+%25) malzemeye gönderilmiştir (Şekil 4.10 (a)). Daha sonra iki atımdan oluşan atımın enerji oranları değiştirilerek (%25+%45) malzeme üzerine gönderilmiştir (Şekil 4.10 (b)). Elde edilen bu iki kavite karşılaştırmaları sonucunda elde edilen delik boyutları ve farklılıkları Tablo 4.5' de sunulmuştur. Tablo 4.5' deki verilerle Şekil 4.11 hazırlanmıştır.



Şekil 4.10: Atım enerji oranlarının değişimin etkisi

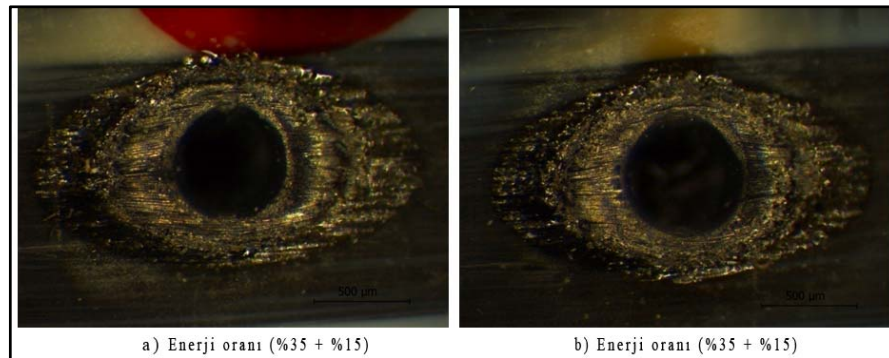
Tablo 4.5: Atım enerji oranlarının değişiminin etkisi

	Enerji oranları	Enerji (J)	Delik Çapı (μm)	HAZ (Min), μm	HAZ (Mak), μm	Saçılma Bölgesi (Min), μm	Saçılma Bölgesi (Mak), μm
Şekil 4.10 (a)	%45+%25	3,86	610,17	762,71	1076,27	1019,77	1703,39
Şekil 4.10 (b)	%25+%45	3,86	615,82	827,68	1005,65	1019,77	1666,67
	% değişim	0,00	0,93	8,52	-6,56	0,00	-2,16



Şekil 4.11: Tablo 4.5' deki verilerin karşılaştırılması

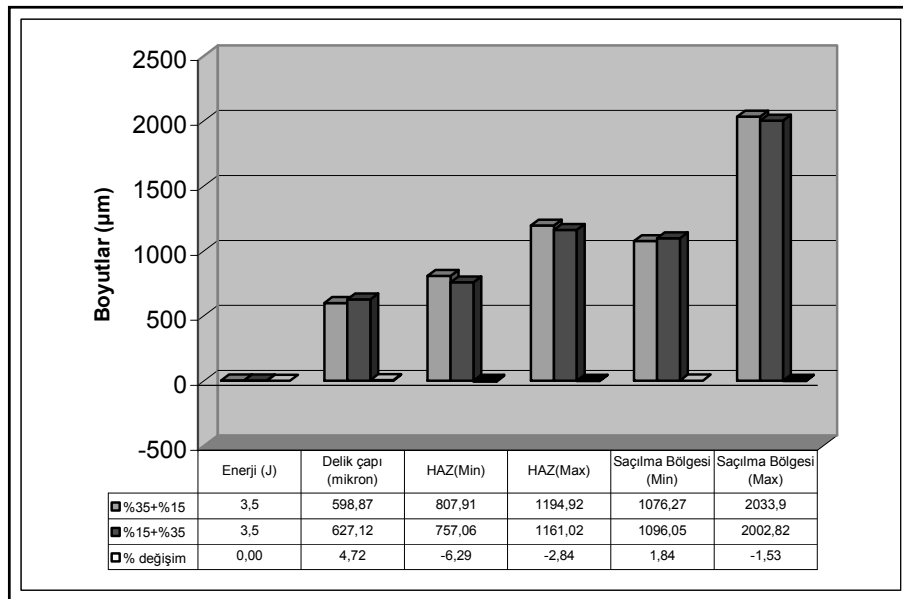
Daha sonra, enerji oranı (%35+%15) olan atım (Şekil 4.12 (a)) ile enerji oranı (%15+%35) olan atımlar (Şekil 4.12 (b)) malzeme üzerine gönderilerek atım enerji oranının delik şekli üzerine etkisini gözlemlenmiştir. Bu iki atımda da toplam enerji miktarı sabit tutulmuştur. Bu iki atım sonucunda elde edilen delik boyutları ve farklılıklar Tablo 4.6' da sunulmuştur. Tablo 4.6' daki verilerle Şekil 4.13 hazırlanmıştır.



Şekil 4.12: Atım enerji oranlarının değişimin etkisi

Tablo 4.6: Atım enerji oranlarının değişiminin etkisi

	Enerji oranları	Enerji (J)	Delik Çapı (μm)	HAZ (Min), μm	HAZ (Mak), μm	Saçılma Bölgesi (Min), μm	Saçılma Bölgesi (Mak), μm
Şekil 4.12 (a)	%35+%15	3,5	598,87	807,91	1194,92	1076,27	2033,9
Şekil 4.12 (b)	%15+%35	3,5	627,12	757,06	1161,02	1096,05	2002,82
	% değişim	0,00	4,72	-6,29	-2,84	1,84	-1,53



Şekil 4.13: Tablo 6' daki verilerin karşılaştırılması

Karbon Fiber takviyeli polimer kompozit malzeme üzerine atımlı Nd:YAG lazer ile açılan deliler veya oluşturulan kaviterler incelendiğinde;

- Delik oluşumunda, lazer atım enerjisinin en önemli parametre olduğu görülmüştür. Delikler daha yüksek enerjilerde oluşmuştur. Düşük enerjilerde yüzeyde kaviterler oluşmuştur.
- HAZ ve saçılma bölgesi elips şeklinde oluşmuştur ve elipslerin ana eksenı ısı yayılımından dolayı fiberlerin yönelimindedir.
- Tek atım yerine toplamda aynı enerjili daha fazla sayıda atım sonucunda daha küçük HAZ ve saçılma bölgesi oluşturmaktadır. Lazer demet çapı 400 μm olduğu

göz önüne alındığında çoklu atım kullanmak daha iyi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

- Arka arkaya atılan atımlar kullanıldığında, atım oranı, HAZ ve saçılma bölgesinin şeklini etkilemektedir. Yüksek atım, küçük atımdan sonra olduğunda, daha küçük HAZ ve saçılma bölgesi oluşmaktadır.

Yüksek enerjili tek atımlarda delik oluşumu elde edilmesine rağmen, tek atım yerine toplamda aynı enerjiye sahip çoklu atım kullanıldığında, sadece kavite oluşumu gözlenmektedir.

Tablo 4.7: Çoklu ve tekli atım değişimlerinin karşılaştırılması.

Enerji (J)	Kavite Çapı (μm)	HAZ (Min), μm	HAZ (Mak), μm	Saçılma Bölgesi (Min), μm	Saçılma Bölgesi (Mak), μm
0,1 x 3	485,06	613,79	652,87	740,23	1160,92
0,3	510,34	616,09	724,14	740,23	1179,31
0,1 x 7	452,87	622,87	668,97	735,63	970,11
0,7	564,97	717,51	875,71	793,79	1355,93
0,1 x 35	457,63	550,85	680,79	717,51	985,88
3,5	598,87	841,81	1062,15	1039,55	1703,39

Tablo 4.8: Değişik enerji oranlarına göre değişimlerin karşılaştırılması.

Enerji oranları	Enerji (J)	Delik Çapı (μm)	HAZ (Min), μm	HAZ (Mak), μm	Saçılma Bölgesi (Min), μm	Saçılma Bölgesi (Mak), μm
%45+%25	3,86	610,17	762,71	1076,27	1019,77	1703,39
%25+%45	3,86	615,82	827,68	1005,65	1019,77	1666,67
%35+%15	3,5	598,87	807,91	1194,92	1076,27	2033,9
%15+%35	3,5	627,12	757,06	1161,02	1096,05	2002,82

BÖLÜM 5. Nd:YAG LAZER KULLANARAK PC POLİMER DELME

5.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, 3 Harmoniğe sahip atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazeri kullanılarak kalınlığı 1 mm olan polikarbonat malzeme atmosfer basıncında ve vakum ortamında delme işlemleri yapılmıştır. Bu bölümde deneysel çalışmada kullanılan lazer ve optik sistemden oluşan deneysel düzenek ayrıntılı olarak incelenecektir. Bu çalışmada kullanılan polikarbonat delme işlemine hazırlaması, özellikleri ve neden lazerle delme işlemi gerektiği hakkında ayrıntılı açıklamalar yapılacaktır.

5.2 PC Polimer Malzemenin Delinmesinde Kullanılan Nd: YAG Lazer ve Deneysel Düzenek

Bu deneysel çalışmada Continuum şirketi tarafından üretilen atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazeri kullanılmıştır. Yüksek enerji yoğunluğuna sahip bu lazer, çeşitli malzemeleri delme işlemlerini yapabilecek kabiliyete sahiptir. Deneyde kullanılan Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 5.1 'deki verilmiştir.

Tablo 5.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM)'nde bulunan ve deneysel çalışmada kullanılan atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri

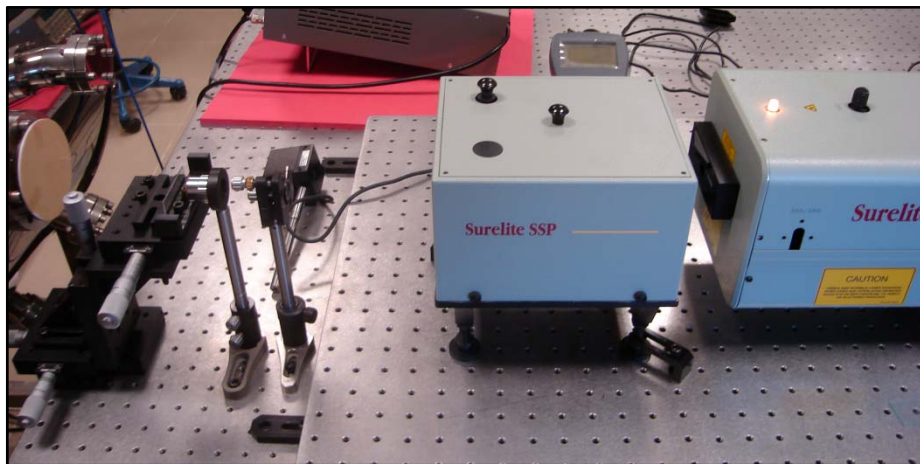
Özellikler		Değerler
Maksimum Ortalama Güç		10 W
Atım süresi		6 ns
Atım enerjisi	1064 nm	1 J
	532 nm	450 mJ
	355 nm	290 mJ
Tepe gücü	1064 nm	167 MW
	532 nm	75 MW
	355 nm	48.3 MW
Lazer çıkış demet çapı		9,8 mm

Deney düzeneği, vakum ortamı ve atmosfer basıncı olarak iki tip şekilde kurulmuştur. Vakum ortamlı lazer sistemi Şekil 5.1’ deki gibi, atmosfer basınçlı ortam lazer sistemi ise Şekil 5.2’ deki gibi kurulmuştur.



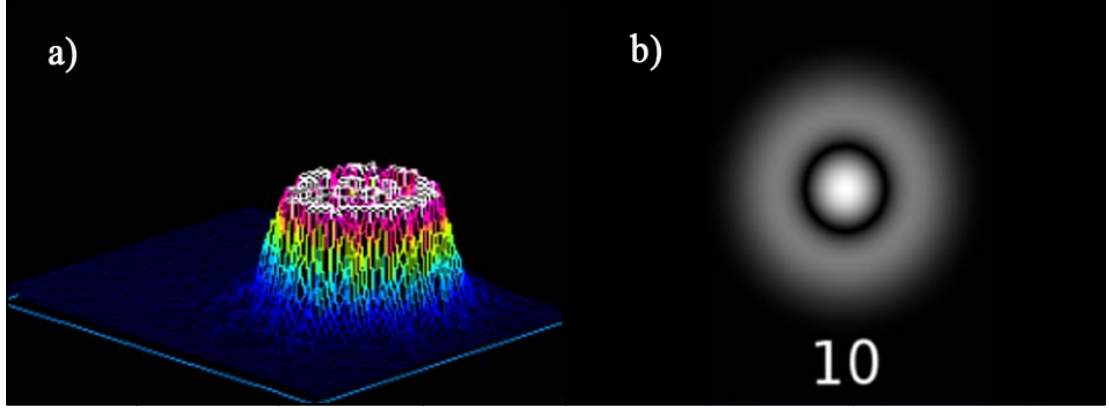
Şekil 5.1: Vakum Ortamının dış ve iç görünümü

Çalışmada kullanılan lazerin 3 harmoniği bulunmaktadır. 1. harmonik 1064 nm dalga boyuna ışınım yaparak, 1.41 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 1 J’ dur. 2. harmonik 532 nm dalga boyunda ışınım yaparak, 1,42 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 450 mJ’ dur. 3. harmonikte ise 355 nm dalga boyunda ışınım yaparak, 1,44 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 290 mJ’ dur. Lazer çıkış demet çapı 9,8 mm olan bu lazer atım süresi 6 ns ve atım tekrarlama oranı 10 Hz’ dir. Tetikleme (triger) sistemi ile atım tekrarlama oranı 1 – 10 Hz aralığına genişletilebilmektedir.



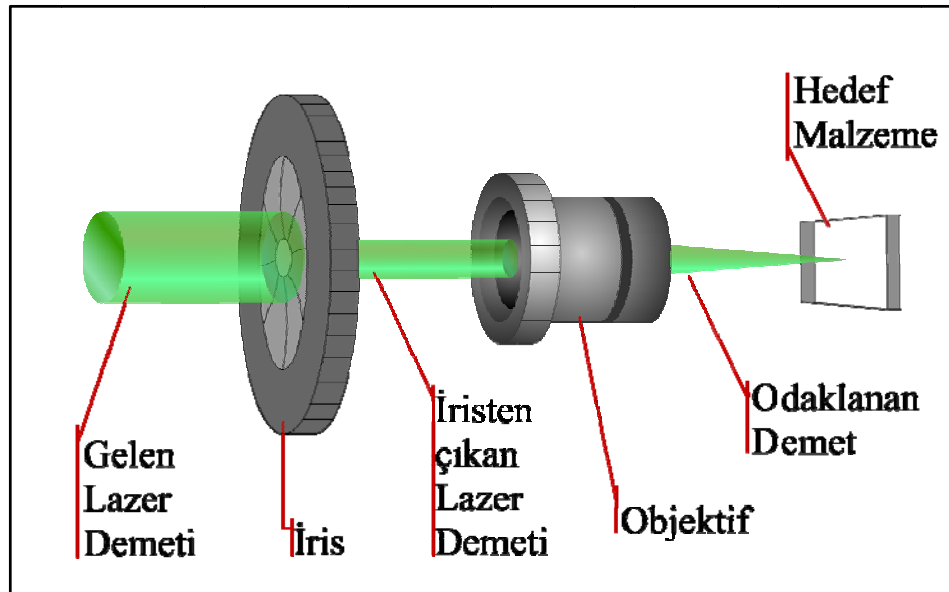
Şekil 5.2: Atmosfer Basınçlı ortam görünümü

Lazer demetinin boyuna modu, demet şekil belirleyici (LPB serisi NEWPORT) kullanılarak TEM_{10} olarak belirlendi. Lazer demetinin TEM modu Şekil 5.3’ deki gibidir.



Şekil 5.3: Lazer mod görüntüsü: (a) Lazer demetinin TEM_{10} modunun demet şekil belirleyici ile elde edilen görüntüsü (b) Bir TEM_{10} modu görüntüsü

Çalışma esnasında kullanılan optik sistem Şekil 5.3’ de gösterildiği gibidir. Lazer sisteminden gelen ışın ilk olarak iris üzerine düşürülmektedir. Lazer sisteminden ışın demet çapı 9,8 mm olarak çıkan ışın 1 mm çaplı iristen geçtikten sonra 1 mm çapında bir ışın demeti şeklinde ilerler. İlerleyen bu demet, odak uzaklığı 14 mm olan ve 4 kat (4x) büyütme oranına sahip bir objektif üzerine düşürülür. Objektiften 14 mm uzaklığa odaklanan lazer demetinin bütün enerjisi bir noktaya toplanmış (odaklanmış) olur. Malzeme üzerine düşen demetin çapı $20\ \mu m$ ’ dir.



Şekil 5.4: İris, objektif ve hedef malzemedan oluşan optik sistem

Şekil 5.4’ de görülen optik sistem hem atmosfer basınçlı ortama hem de vakum ortamına pratik olarak kuruldu ve deneysel çalışmalar gerçekleştirildi. Kullanılan vakum ortamının yanal yüzeyi yüksekliği 750 mm ve çapı 1000 mm olan silindirik bir yapıdır. Elde edilen vakum ortamı basıncı 10^{-6} Torr’ dur.

5.3 Polimerlerin Lazerle İşlenmesi

Lazer ışını malzeme üzerine düşürüldüğünde, soğurulan lazer enerjisi hedef malzemeyi ısıtır ve malzeme önce sıvı hale daha sonra da gaz hale geçer ve malzeme kaviteden dışarı tahliye olur. Bu işleme ablasyon denir [22, 23, 25, 27].

Polimerlerin lazerle ablasyonu son yirmi yıl içinde birçok çalışmaya konu olmuştur [22, 23]. Ablasyon için temel olarak, foto-ısıl ve foto-kimyasal olmak üzere iki model sunulmuştur. Her ikisinde de çıkarılan malzeme gaz halinde tahliye edilir. Lazerin dalgaboyu, malzemenin ısısal özellikleri, lazer atım genişliği ve enerji yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak yöntem seçimi yapılır. Kısa dalgaboylu fotonlar daha yüksek enerjili olduğundan foto-kimyasal tepkime başlatırlar [25]. Uygulamada en önemli parametre malzemede ısısal deformasyon olmaması ve uygulamanın tekrarlanabilir olmasıdır. Fotokimyasal ablasyon modeli, temel polimer zincirinin kovalent bağlarının kırılması veya polimer zincirinin molekülleri ile komşu zincirin molekülleri arasındaki daha zayıf bağların kırılması ile açıklanır. Foto-ısıl modelde yüzey ve malzeme ısıtılır. Moleküllerin elektronları lazer fotonlarını soğurarak uyarılır. Daha sonra soğurulan enerji titreşim ve dönme enerjisi olarak sıcaklığı artırır ve kritik sıcaklık aşıldıkça bağlar kırılmaya başlar [22, 23]. C-C bağları için ortalama bağ enerjisi yaklaşık 347 kJ/mol ve C-H bağları için yaklaşık 414 kJ/mol dır. Bu bağları kırmak için gerekli olan foton enerjileri sırasıyla 3,6014 eV (dalga boyu 344 nm) ve 4,2967 eV (dalga boyu 288 nm) [25]. Bu enerjiler Nd:YAG lazerin harmonikleri ile elde edilebilir.

PMMA gibi düşük soğurma katsayısına sahip malzemeler için düşük dalga boyu (355 veya 266 nm) lazer için sıcaklık etkisi göz ardı edilebilir [22, 23, 27].

Termoplastik polimerler özel zincir moleküllerinden meydana gelir. Zincirleri oluşturan monomerler, sıkı kovalent bağlarla (40-500 kJ/mol) bağlanmıştır. Zincirler arası bağlar daha zayıf tiptir (van der Waals < dipol < veya hidrojen bağları). Bu bağların enerjileri 0.2 ile 20 kJ/mol arasındadır [25]. Bu ikinci tür bağlar malzemeyi katı halde tutarlar. Eğer bu ikincil bağlar kırılırsa malzeme sıvı hale geçer [25].

Malzemenin lazerle ablasyon miktarı, radyasyonun parametrelerine, malzemenin özelliklerine ve çevre koşullarına bağlıdır [22, 23, 25, 27].

Saydamlık derecesi kristallik derecesine bağlıdır [25]. PMMA gibi amorf termoplastikler en yüksek saydamlığa sahiptir. Kısa dalgaboyu ve kısa atım süreleri kullanıldığında foton/malzeme etkileşmesi malzeme yüzeyinde meydana gelir. Küçük çaplı delikler elde etmek için kısa atım süreli lazerler (100 ns veya daha az) kullanılmalıdır [25].

Deneyde kullanılan Polikarbonat (PC), termoplastiklerin özel bir grubudur. İşlenmesi, kalıplanması, ısı olarak şekillendirilmesi kolaydır. Polikarbonatlar uzun moleküler zincirleri içinde karbonat grupları (-O-CO-O-) tarafından bağlanmış fonksiyonel gruplara sahiptirler. Polikarbonatların karakteristikleri polimetil metakrilat' a (PMMA; akrilik) oldukça benzer, fakat polikarbonat daha güçlü ve daha pahalıdır. Ayrıca bu polimer oldukça şeffaf ve ışığı geçiren bir yapıdadır. Kullanım alanlarına göre farklı elde etme yöntemleri vardır. Birçok cam türünden daha iyi ışık geçirgenlik karakteristiğine sahiptir. UV ışınlarına karşı dayanımı zayıf fakat üzerine UV koruyucu kaplama yapılarak dayanımı artırılmaktadır. Polikarbonat, endüstri ve laboratuarlarda olduğu kadar ev eşyalarında da yaygın kullanılır. Bankalar ve bazı binalarda kırılmayan veya ışığı yansıtan pencereler gibi yerlerde koruma amaçlı parçaların yapımında kullanılır. Polikarbonatdan yapılan diğer ürünler arasında gözlük ve güneş gözlüğü camları, CD (kompakt disk), otomobil far camları sayılabilir. Ayrıca tek veya çift yüzeyi UV koruyucu madde kaplı polikarbonat levhalar tek cidarlı (solid) ve iki veya daha fazla cidarlı (multiwall) gözenekli levhalar halinde muhtelif renk, kalınlık, özellik ve ebatlarda imal edilerek yapı sektöründe her türlü açıklıkların kapatılmasında kullanılabilen (ışıklık, tonoz, tüp geçit, kubbe vb.) esnek bir kaplama malzemesidir. İyi ısı

yalıtımına ve mukavemeti nedeniyle seralarda cam ve naylona alternatif olarak kullanılmaktadır [41, 42, 43]. Tipik fiziksel özellikleri Tablo 5.2’ deki gibidir.

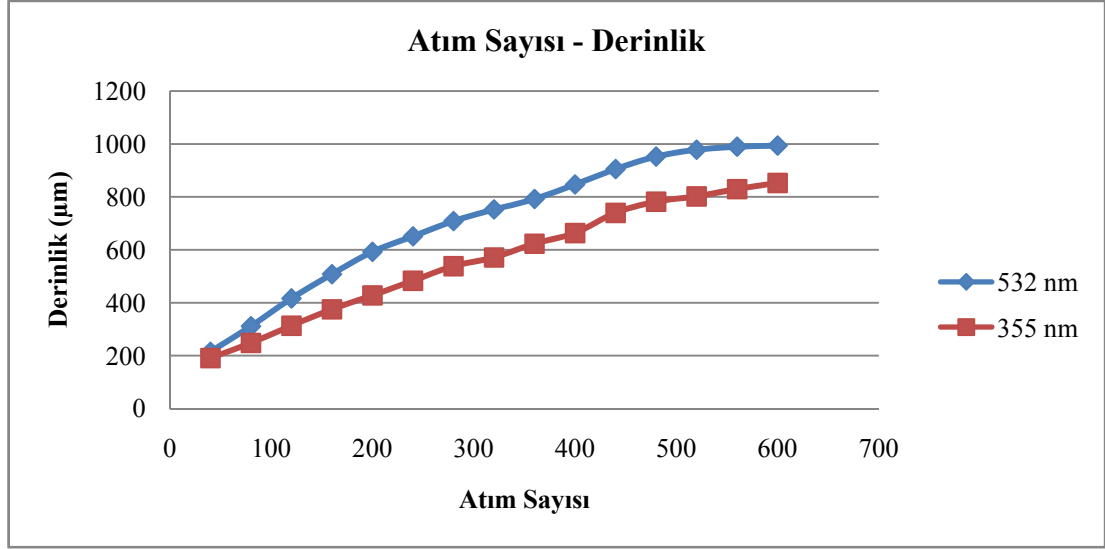
Tablo 5.2: PC polimer malzemenin tipik fiziksel özellikleri [39]

Özellik	Değer
Yoğunluk	1,20 gr/cm ³
Kullanım Sıcaklık Aralığı	(-100 °C) – (+135 °C)
Erim Sıcaklığı Aralığı	270 – 380 °C
Kırılma indisi	1,585 ± 0,001
Işık geçirgenlik indisi	%90 ± %1

5.4 Deneysel Çalışma

Bu çalışmada atımlı Nd: YAG lazeri ile polikarbon delme işleminde delik kalitesine etki eden özelliklerden atım sayısı, atım enerjisi, atım tekrarlama oranı (frekans) ve dalgaboyu değişkenleri incelendi. Kaliteli bir delme işlemi yapmak için bu değişkenlerin uygun değerleri elde edilmesi gerekmektedir.

Deneyde üzerinde delik açmak için kullanılan 1 mm kalınlığındaki polikarbon malzemeler 5 cm x 1.5 cm boyutlarında hazırlanmış olup fiziksel özellikleri Tablo 5.2’ deki gibidir. Deneyin ilk aşamasında uygun kristal kullanılarak Nd:YAG lazerin 2. harmoniği olan 532 nm dalgaboylu ışması elde edildi. İlk olarak atım sayısının delik veya kavite üzerine etkisi araştırıldı. 6 ns atım süreli, 532 nm dalgaboylu ışma 40 atımdan başlayarak 40, 80, 120, ..., 600 atım aralığında 5 Hz tekrarlama oranı ile malzeme üzerine gönderildi. Polikarbon malzeme üzerinde yapılan bu ilk çalışmada atım sayısının derinliğe etkisi incelenmiş olup daha sonraki çalışmalara referans kabul edildi. Şekil 5.5’ de görüldüğü gibi atım sayısı arttıkça derinliğin arttığı gözlemlendi. Derinliğin artması 160 atım sayısından sonra doğrusallığını kaybetmeye başladığından bu atım sayısını sonraki bütün çalışmalarda referans alındı.



Şekil 5.5: Atım sayısının derinliğe etkisi. Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ

Yukarıda bahsedilen delme işleminde delik kalitesi için önemli olan değişkenleri belirlemek için bu referans alındı. Aksi takdirde delme işleminde meydana gelen değişimin hangi değişkenden kaynaklandığı tespit edilemez. Yapılan çalışmada görüntüleme işlemi optik mikroskop ile yapıldı.

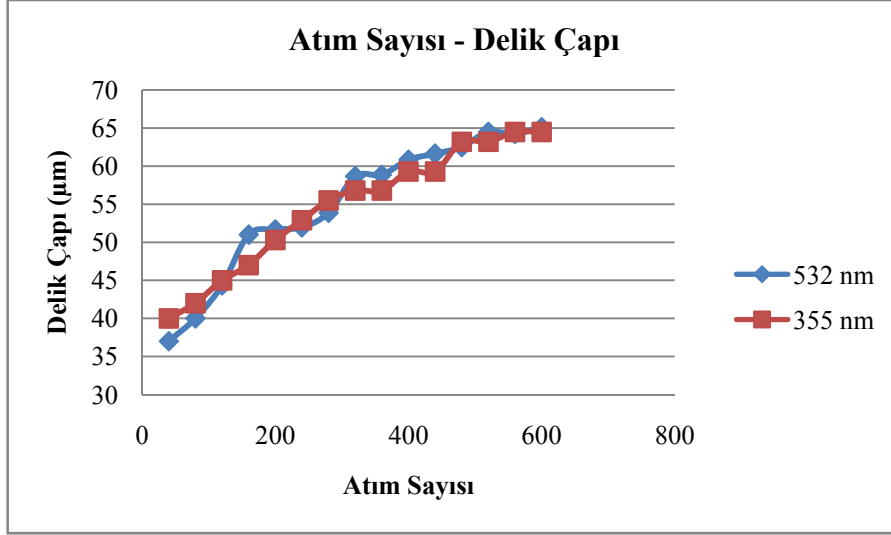
5.4.1 Atım sayısının etkisi

Atım sayısının delik derinliğine etkisi referans ölçümler alındıktan sonra 532 nm ve 355 nm dalga boyları için çalışmalar tekrar yapıldı ve değişimler Şekil 5.5'. 532 nm dalga boylu ışımaya için Şekil 5.5' deki eğilimin aynısı gözlemlendi. Bu incelemede kullanılan değişkenler Tablo 5.3' deki gibidir.

Tablo 5.3: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda atım sayısının değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler

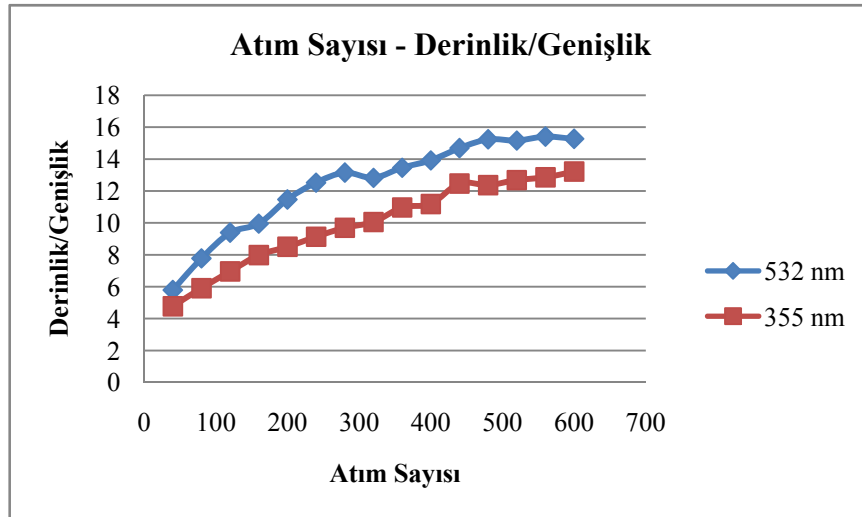
Değişkenler	Değerler
Atım Sayısı	40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 320, 360, 400, 440, 480, 520, 560, 600
Dalga boyu	532 nm ve 355 nm
Enerji	0,0738 mJ
Frekans	5 Hz
Ortam	Atmosfer Basıncı

Atım sayısının artması ile delik çapında da genişleme olduğu gözlemlendi (Şekil 5.6).

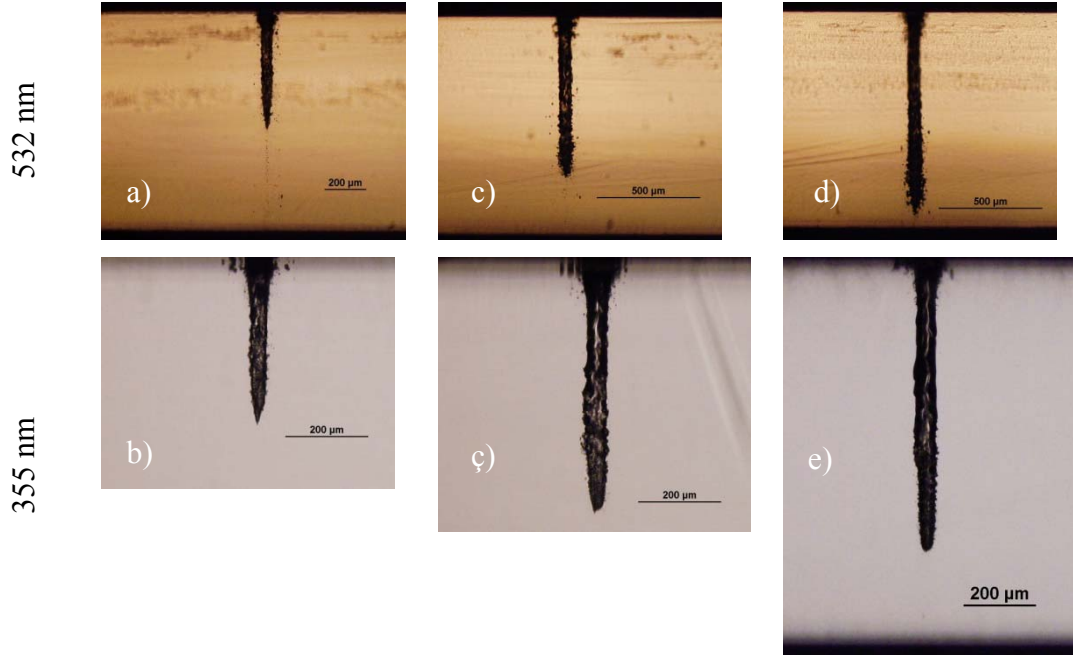


Şekil 5.6: Atım sayısının delik çapına etkisi. Dalga boyu: 532 nm, Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ

Lazerle delik delme işleminde önemli bir orantı da büyük niceliğin küçük niceliğe oranı olarak bilinen derinlik/genişlik oranıdır. Bu oranın büyük olması deliğin ne derece kaliteli olduğu hakkında bilgi verir. Deneysel çalışmamızda bu oranın atım sayısına göre arttığı gözlemlendi (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Atım sayısının derinlik/genişlik oranı göre değişimi. Frekans: 5 Hz, Enerji: 0,07319 mJ



Şekil 5.8: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için atım sayısı değişimleri. (a) ve (b) Atım sayısı: 80. (c) ve (ç) Atım sayısı: 240. (d) ve (e) Atım sayısı: 400.

Şekil 5.8’ de 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için 80, 240 ve 400 atım sayılarının karşılaştırılması verilmektedir. Atımlar belirli bir düzende hedef malzemeye odaklandığı bölgede madde ile etkileşim yaparak eriyik çıkarmaktadır. Atım sayısının artması ile delik derinliğini arttığı gözlemlendi (Şekil 5.5). Yapılan çalışmada yaklaşık 1000 atımda 1 mm kalınlığında PC polimer malzemenin delindiği gözlemlenmiştir. Çalışmada atım sayısının artmasıyla delik çapında da artma olduğu gözlemlendi (Şekil 5.6). Delik çapının artması atımların arda arda gelerek oluşturdukları eriyik zamanla delik duvarının daha fazla ısınmasına ve dolayısıyla erimesine sebep olur. Sonuçta daha fazla miktarda eriyik malzemedan uzaklaşınca delik çapı da artar. Delik kalitesinin belirgin özelliği olan derinlik/genişlik oranı da yapılan çalışmada arttığı gözlemlendi. Bu oranın büyük değerlere ulaşması istenen bir durumdur. Daha uzun ve daha dar delikler bu oran artırılacak şekilde değişkenlerin seçilmesi ile elde edilebilir.

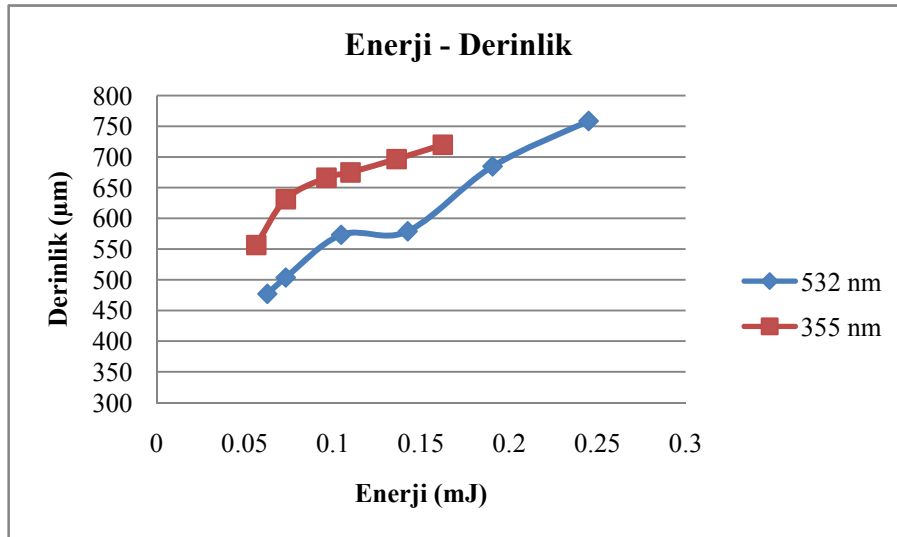
5.4.2 Enerjinin etkisi

Lazerle delme işleminde 532 nm dalga boyuna sahip ışıma kullanılarak polikarbon malzeme üzerinde enerji değişiminin etkisi incelendi. Bu incelemede kullanılan değişkenler Tablo 5.4’ deki gibidir.

Tablo 5.4: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda enerji değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler

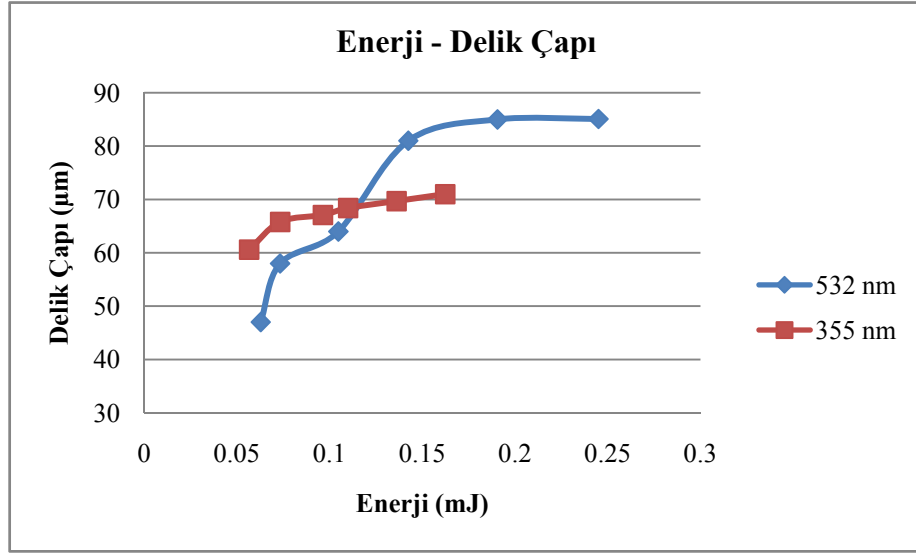
Değişkenler	Değerler
Enerji _{532 nm} (mJ)	0,0628, 0,0733, 0,1047, 0,1424, 0,1905, 0,2449
Enerji _{355 nm} (mJ)	0,0565, 0,0733, 0,0963, 0,1089, 0,1361, 0,1623
Dalga boyu	532 nm ve 355 nm
Atım Sayısı	160
Frekans	5 Hz
Ortam	Atmosfer basıncı

Burada lazer atım enerjisi değişken alınarak Tablo 5.4’ de verilen değerler kullanılarak delme işlemi gerçekleştirildi. Yapılan incelemede atım enerjisi artarken derinliğinde arttığı gözlemlendi (Şekil 5.9).



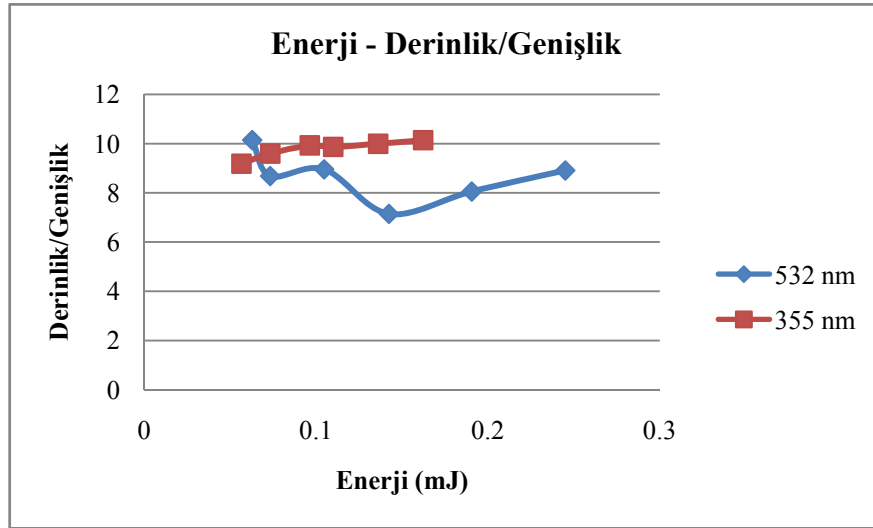
Şekil 5.9: Enerjinin derinliğe etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160

Enerjinin artması ile derinliğin arttığı gözlemlendiği gibi delik çapının da genişlediği gözlemlendi (Şekil 5.10).



Şekil 5.10: Enerjinin delik çapına etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160

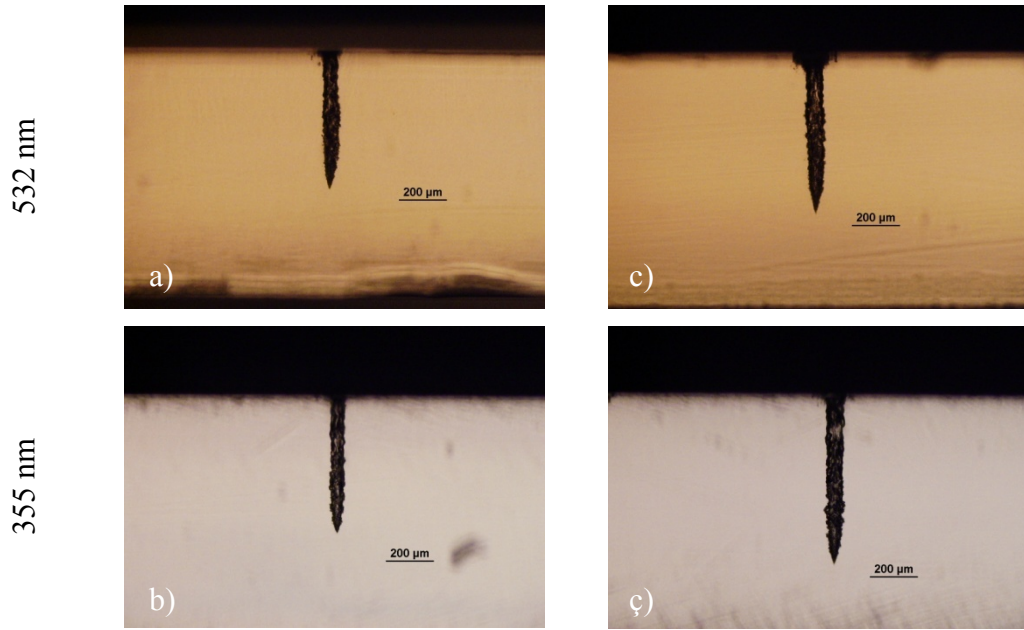
Enerji arttıkça derinlik/en oranında yer yer azalmalar ve artmalar gözlemlendi (Şekil 5.11). Bu da bize kaliteli bir delik delme işlemi için enerjinin sürekli artırılması gerekmediğini ve belirli bir değerde sınırlama yapmamız gerektiğini söylemektedir.



Şekil 5.11: Enerji değişiminin derinlik /genişlik oranına etkisi. Frekans: 5 Hz, Atım sayısı: 160

Bu çalışmada delme işleminde lazer enerjisi arttıkça hem derinliğin hem de delik çapının arttığı gözlemlendi. Kullanılan malzemenin özelliklerine göre enerji değişkenin

belirlenmesi çok önemlidir. Malzemeyi delmek için buharlaşma sürecinin olması gerekmektedir. Bu süreç ise malzemeye uygun yeterli miktarda enerji verilerek gerçekleştirilebilir. Enerjinin delme işlemine etkisi incelendiğinde 532 nm ve 355 nm dalgaboylarında farklılıklar görüldü. Şekil 5.9 ve Şekil 5.12’ de bu farklılıklar gösterilmiştir. Çalışmada yüksek enerjilere çıkıldığında 532 nm dalgaboyunda delik çevresinde yanmaların arttığı ve delik çapının arttığı gözlemlendi. Bu da kaliteli bir delme işlemi için istenilen bir durum değildir. 532 nm dalgaboyunda delik çapında daha fazla bir genişleme gözlenmesine rağmen 355 nm dalgaboyunda delik çapında daha az genişleme gözlemlendi. Derinlik/genişlik oranında da 532 nm dalgaboyu için yer yer azalma ve artmalar gözlemlendi. 355 nm dalgaboyu için bu oranda düzenli ve yavaş bir artma gözlemlendi. Lazerle delme işleminde gerekli lazer gücü, malzemenin ısı iletkenliği gibi değişkenleri içeren ısısal özelliklere, yansıma ve soğurma gibi değişkenleri içeren optik özelliklerine göre seçilir. Burada kısa dalgaboylu ışımının yansıma ve soğurma yönünden daha avantajlı olduğu ortaya çıkmış olur.



Şekil 5.12: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için enerji değişimleri. (a) Enerji: 0,0628 mJ. (b) Enerji: 0,0565 mJ. (c) Enerji: 0,2449 mJ. (d) Enerji: 0,1623 mJ.

5.4.2 Frekansın etkisi

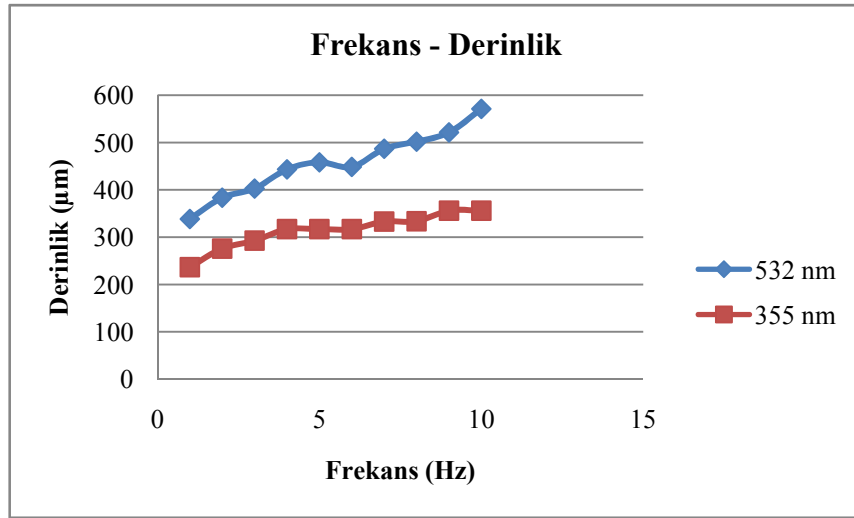
Lazerle delme işleminde atım tekrarlama oranı yani lazer frekansı önemli bir değişkendir. İki atım arasında geçen sürede hedef malzemede soğuma meydana

geleceğinden tekrar katılaşma olabilir. Bunun için frekansı uygun bir aralıkta tutmak gerekir. Bu incelemede kullanılan değişkenler Tablo 5.5’ deki gibidir.

Tablo 5.5: 532 nm ve 355 nm dalga boyunda frekans değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler

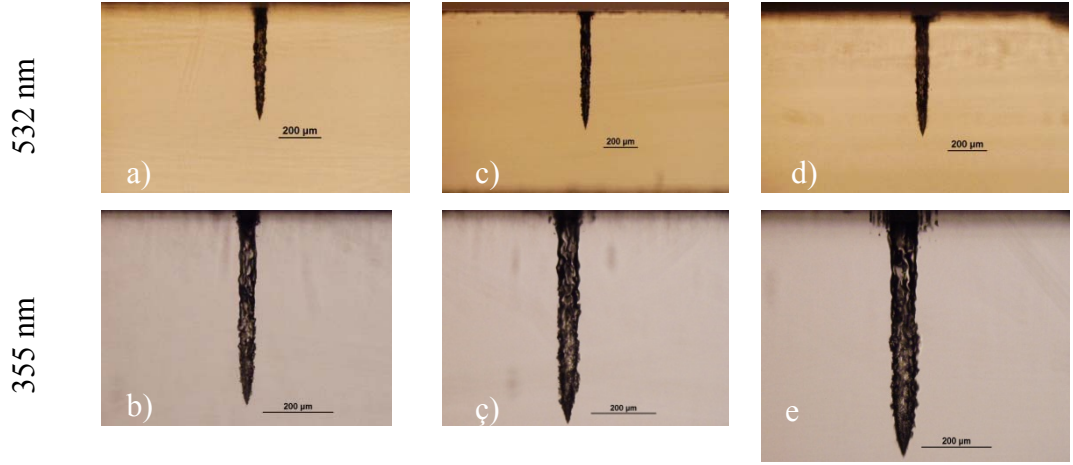
Değişkenler	Değerler
Frekans (Hz)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
Dalga boyu	532 nm ve 355 nm
Enerji	0,0738 mJ
Atım sayısı	160
Ortam	Atmosfer basıncı

Yapılan çalışmada frekans değişimine göre derinlikte artma gözlemlendi. Şekil 5.13’ de bu değişim gösterilmektedir.



Şekil 5.13: Frekansın derinliğe etkisi. Enerji: 0,07329 mJ, Atım sayısı: 160

Çalışmada aynı bölgeye art arda atım gönderilerek yapılan bu işlemde frekansın etkisi incelenmiş olup 532 nm ve 355 nm için farklı derinlikler elde edilmiştir. Frekans arttıkça derinliğin arttığı gözlemlendi. Frekansın 10 Hz’ e yakınlığı durumlarda delik duvarlarında kötüleşme olduğu gözlemlendi. Bunun sebebi ilk atım malzeme ile etkileşirken art arda gelen atımlar önceki atımların oluşturduğu eriyikle etkileşmeye girebilir. Bu da istenen bir durum değildir. Bundan dolayı frekans değişkeni uygun aralıklarda seçilmeli.



Şekil 5.14: 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için Enerji değişimleri. (a) ve (b) Frekans: 1 Hz. (c) ve (ç) Frekans: 5 Hz. (d) ve (e) Frekans: 10 Hz.

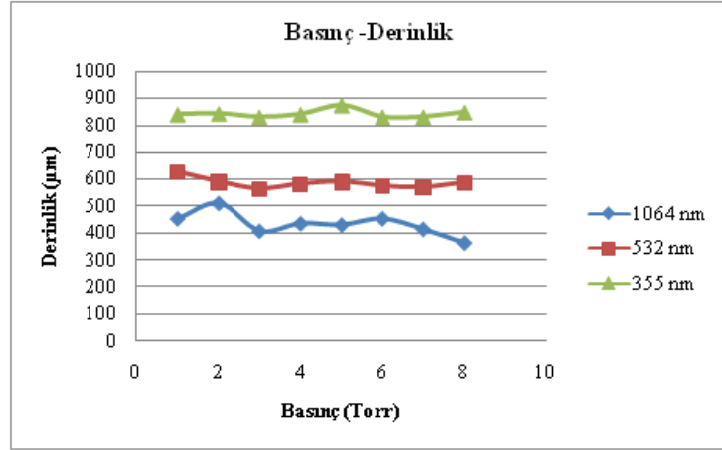
5.4.4 Vakumun etkisi

Atmosfer basıncında yapılan çalışmalardan sonra vakum odasında da 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için değişen basınçlarda Tablo 5.6’ de verilen değerlere göre inceleme yapıldı.

Tablo 5.6: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalga boyunda basınç değişiminin derinliğe etkisi için kullanılan değişkenler

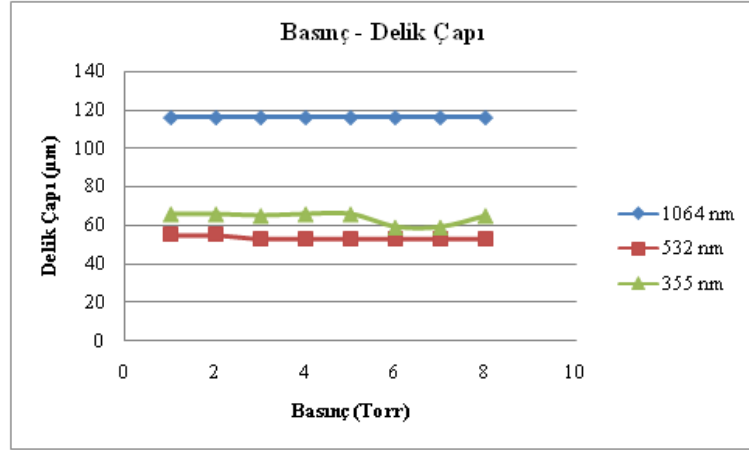
Değişkenler	Değerler
Basınç (Torr)	$1,5 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-1} - 2,3 - 5,3 - 1,3 \cdot 10^1 - 5 \cdot 10^1 - 1,5 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^2$
Dalga boyu	1064 nm, 532 nm ve 355 nm
Enerji _{1064 nm}	0,9423 mJ
Enerji _{532 nm}	0,0738 mJ
Enerji _{355 nm}	0,0738 mJ
Atım sayısı	160
Frekans	5 Hz

Artan basınç değerlerine karşın derinlikte kısmi olarak azalma olduğu gözlemlendi. Bu değişim Şekil 5.15’ de görülmektedir.



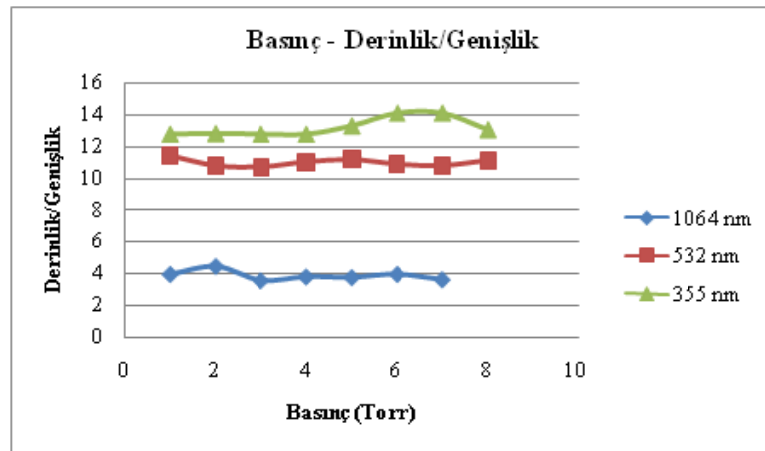
Şekil 5.15: Basınç değişiminin derinliğe etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz

Yapılan çalışmada delik çapının değişmediği gözlemlendi (Şekil 5.16).



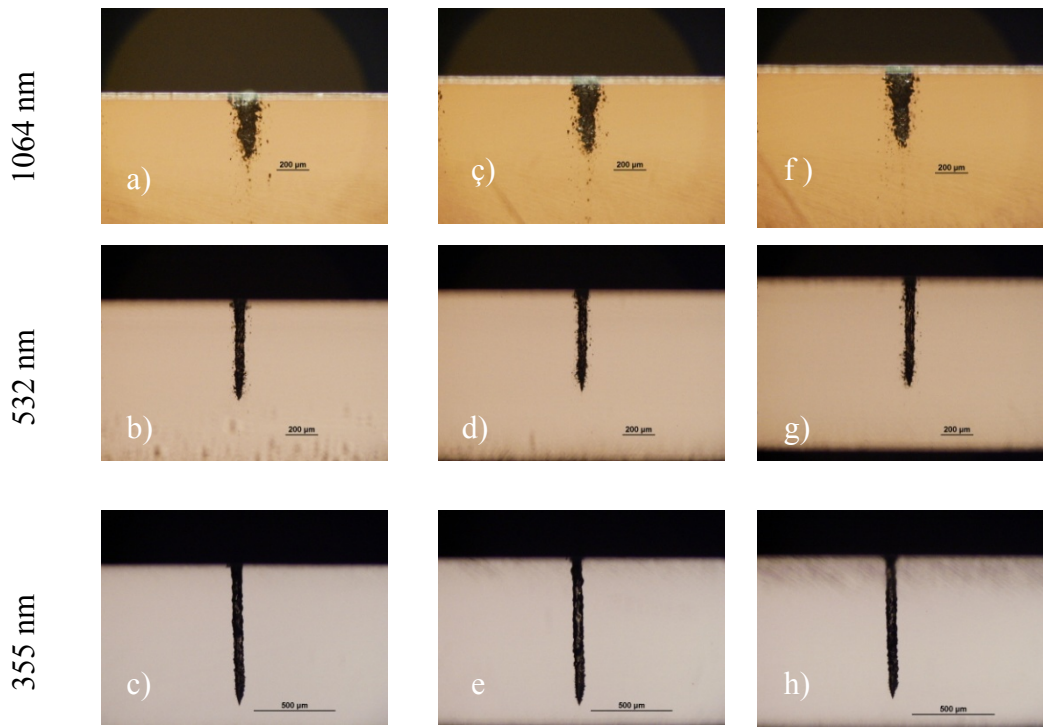
Şekil 5.16: Basınç değişiminin delik çapına etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz

Derinlik/Genişlik oranında azalma gözlemlendi (Şekil 5.17).



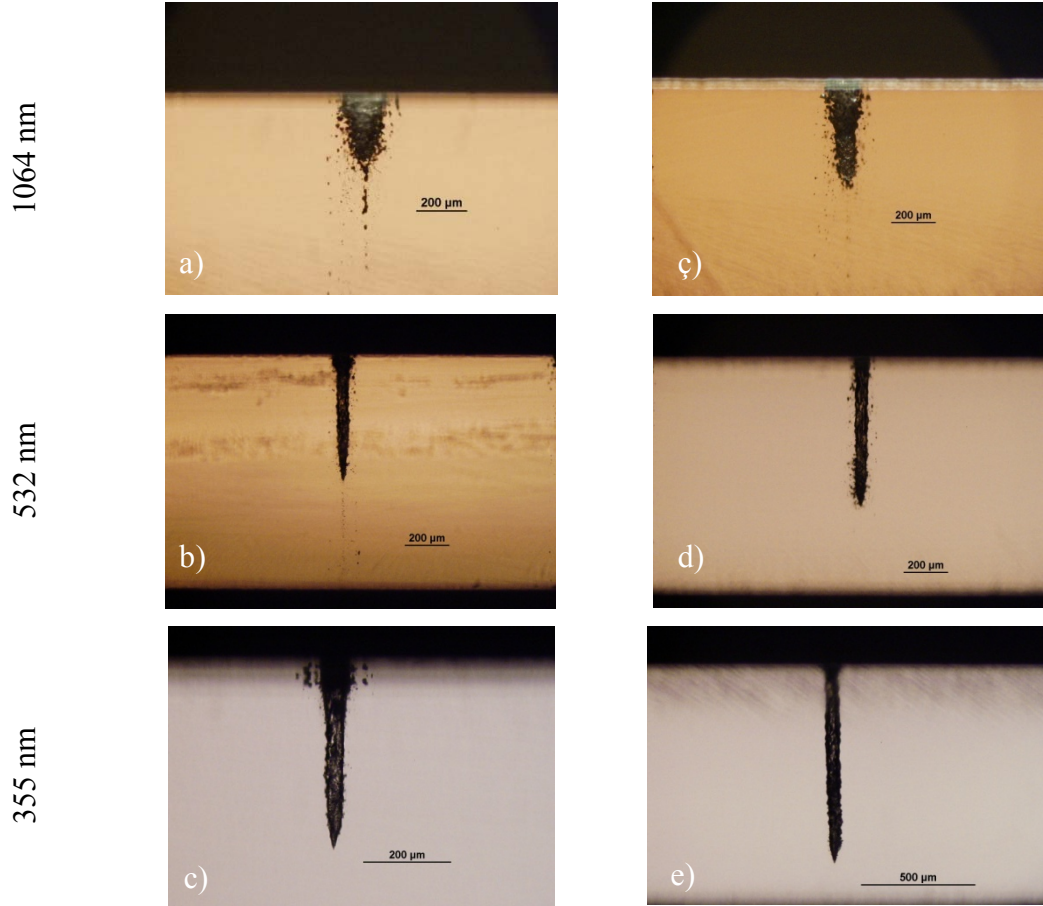
Şekil 5.17: Basınç değişiminin derinlik/genişlik oranına etkisi. Atım sayısı: 160, Frekans: 5Hz

Deneysel çalışmanın bu kısmında 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalga boylarında daha önceki çalışmalardan referans alınan atım sayısı (160) ve frekans (5 Hz) değerlerlerinde vakum ortamında çalışmalar gerçekleştirildi. Yapılan çalışmada basınç değişimine karşın derinlikte fazla bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.15). Bununla beraber farklı dalga boylarına göre delik çapında da fazla bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.16). Derinlik/genişlik oranı da derinlik ve delik çapına bağlı olarak fazla bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 5.17). Şekil 5.18’ de bu değişimler dalgaboylarına göre gösterilmiştir.



Şekil 5.18: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için basınç değişimleri. (a), (b) ve (c) Basınç: 3.10^2 Torr. (ç), (d) ve (e) Basınç: $1,3.10^1$ Torr. (f), (g) ve (h) Basınç: $1,5.10^{-5}$ Torr.

Deneysel çalışmada ayrıca atmosfer basıncı ile vakum ortamında yapılan çalışmaların farklılıkları incelenmiştir. Şekil 5.19’ da atmosfer basıncı ve vakum ortamı için farklı dalgaboylarına göre derinlikler gösterilmektedir. Atmosfer basıncına göre vakum ortamında yapılan çalışmada derinliğin biraz arttığı ve yanmanın azaldığı gözlemlendi.



Şekil 5.19: 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalgaboyları için basınç değişimleri. (a), (b) ve (c) Basınç: Atmosfer Basıncı. (ç), (d) ve (e) Basınç: $1,5 \cdot 10^{-5}$ Torr.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının amacı lazer ile polimer ve güçlendirilmiş polimer malzemeler üzerine kaliteli ve yüksek derinlik/genişlik oranlı delikler elde etmek için parametreler belirlemektir.

Çalışmanın deneysel kısmı iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzeme üzerine uzun atımlı (ms mertebesinde) ve yüksek tepe güçlü lazer ile delikler delinmiş ve lazer parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen deliklerin görüntüleri TUBİTAK MAM' da bulunan yüksek çözünürlüklü optik mikroskop ile alınmıştır. Elde edilen görüntülere göre daha kaliteli delik elde edebilmek için lazer parametreleri değiştirilmiş ve parametrelerin delik kalitesine etkileri incelenmiştir.

Karbon Fiber takviyeli polimer kompozit malzeme üzerine atımlı Nd:YAG lazer ile açılan delikler veya oluşturulan kaviteler incelendiğinde;

- Delik oluşumunda, lazer atım enerjisinin en önemli parametre olduğu görülmüştür. Delikler daha yüksek enerjilerde oluşmuştur. Düşük enerjilerde yüzeyde kaviteler oluşmuştur.
- HAZ ve saçılma bölgesi elips şeklinde oluşmuştur ve Elipslin ana eksenini ısı yayılımından fiberlerin yönelimindedir.
- Tek atım yerine toplamda aynı enerjili daha fazla sayıda atım sonucunda daha küçük HAZ ve saçılma bölgesi oluşturmaktadır. Lazer demet çapı 400 µm olduğu göz önüne alındığında çoklu atım kullanmak daha iyi sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.
- Arka arkaya atılan atımlar kullanıldığında, atım oranı, HAZ ve saçılma bölgesinin şeklini etkilemektedir. Yüksek atım, küçük atımdan sonra olduğunda, daha küçük HAZ ve Saçılma bölgesi oluşmaktadır.

- Yüksek enerjili tek atımlarda delik oluşumu elde edilmesine rağmen, tek atım yerine toplamda aynı enerjiye sahip çoklu atım kullanıldığında, sadece kavite oluşumu gözlenmektedir.

Uzun atımlı lazer ile elde edilen delikler incelendiğinde, fiberlerin koptuğu, polimer malzemelerde ise yanmalar olduğu gözlenmiştir.

Deneyin ikinci kısmında ise 1mm kalınlığında polikarbon malzeme üzerinde lazer ile delik çalışmaları yapılmıştır. 5. bölümde anlatılan deneyin birinci kısmında kullanılan lazer ile 6. bölümde anlatılan deneyin ikinci kısmında kullanılan lazer arasındaki en önemli fark lazer atım süresidir. Polikarbonat malzeme üzerine gönderilen lazerin atım süresi 6 ns dir. Malzemelerin mikro işleminde düşük atım süreli lazerler kullanılmaktadır. Daha düşük atım süreli lazerlerle delik çapı daha düşük delikler elde edilebilir. Ayrıca bu bölümde kullanılan lazerin 532 nm dalgaboyuna sahip 2. harmoniği ve 355 nm dalgaboyuna sahip 3. harmoniği bulunmaktadır. Daha kısa dalga boyları ise malzemede yanma etkisini azaltmaktadır. Dolayısıyla çalışmanın amacı olan daha yüksek derinlik/genişlik elde etmek için kısa atımlı ve düşük dalgaboylu lazerler tercih edilmelidir.

Deneyin bu kısmında, uygun kristal kullanılarak Nd:YAG lazerin 2. harmoniği olan 532 nm dalgaboylu ışınması elde edildi. İlk olarak atım sayısının delik veya kavite üzerine etkisi araştırıldı. 6 ns atım süreli, 532 nm dalgaboylu ışınma 40 atımdan başlayarak 600 atıma kadar 5 Hz tekrarlama oranı ile malzeme üzerine gönderildi. Polikarbon malzeme üzerinde yapılan bu ilk çalışmada atım sayısının derinliğe etkisi incelendi. Atım sayısının kavite derinliğine etkisini görmek için Şekil 5.5 deki grafik çizilmiştir. Elde edilen eğriden de görüleceği gibi, delik derinliği, eğrinin eğimi azalarak artmıştır. Delik genişliğindeki değişim de delik derinliği ile aynı şekilde arttığı gözlenmesine rağmen, delik derinliği, delik genişliğine göre daha fazla artış göstermiştir. Sonuç olarak atım sayısı arttığında daha yüksek derinlik/genişlik oranlı delik elde edilmiştir.

Daha sonra, 532 nm dalga boyuna sahip ışınma kullanılarak polikarbon malzeme üzerinde enerji değişiminin etkisi incelendi. Enerjinin artması ile derinliğin arttığı

gözlendiği gibi delik çapının da genişlediği gözlemlendi. Enerji arttıkça derinlik/en oranında yer yer azalmalar ve artmalar gözlemlendi (Şekil 5.11). Buradan da, kaliteli bir delik delme işlemi için enerjinin sürekli artırılması gerekmediğini ve belirli bir değerde sınırlama yapmamız gerektiği anlaşılmaktadır.

Frekansın delik derinlik/genişlik oranına etkisini görmek için yapılan çalışmada frekans değişimine göre derinlikte artma gözlemlendi. Şekil 5.13' de bu değişim gösterilmektedir. Frekansın 10 Hz' e yakınlığı durumlarında delik duvarlarında istenilen kalitede olmadığı gözlemlendi. Bunun sebebi ilk atım malzeme ile etkileşirken art arda gelen atımlar önceki atımların oluşturduğu eriyikle etkileşmeye girebilir. Bu da istenmeyen bir durum olduğundan, frekansın da delik kalitesi üzerine etkili parametrelerden biri olduğu söylenebilir. 532 nm dalga boylu ışın ile elde edilen deliklerde veya kavitelerde yanma etkisi de gözlemlendi. Literatürlerden faydalanılarak yanma etkisini azaltmak için daha küçük dalga boylu ışın kullanmak gereklidir.

Deliklerde oluşan yanma tam olarak kontrol edilemediğinden ve delik, içinde ve delik etrafında pürüzlülük oluşturduğundan istenmeyen durumdur. Bunun için aynı parametreler, kullanılan lazerin 3. harmoniği olan 355 nm dalga boylu ışın ile tekrarlandı. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde yanma etkisinin hemen hemen kaybolduğu gözlemlendi.

Son olarak, atmosfer basıncında yapılan çalışmalardan sonra vakum odasında da 1064 nm, 532 nm ve 355 nm dalga boyları için değişen basınçlarda inceleme yapıldı. Yapılan incelemeler sonucunda ortam basıncı azaldıkça elde edilen deliklerin derinliğinde ve genişliğinde değişiklik gözlenmedi. Ancak 1064 nm dalga boyu ile vakum ortamında elde edilen kavitelerde yanma etkisinin oldukça azaldığı gözlemlendi. 532 nm dalga boyu ile vakum ortamında elde edilen kavitelerde ise yanma etkisi hemen hemen hiç gözlenmedi. 355 nm dalga boyu ile vakum ortamında elde edilen kavitelerde ise vakum dışında da yanma etkisi gözlenmediğinden, yanma etkisi ve derinlik/genişlik oranı üzerine etkisi olmadığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada, özellikle ileri teknoloji ve bilgi gerektiren malzemeler üzerine yapılan çalışmalar için çok önemli yararlar sağlayacaktır. İleri teknoloji ve bilgi gerektiren

malzemelerin işlenmesi ve özellikle de mikro-işlenmesi her geçen gün kullanımı artan lazer sistemlerinin ülkemizde de kullanımının artmasında büyük etken olacaktır. Günümüzde teknolojinin gelişimi ile birlikte, endüstriyel, elektronik ve medikal aletlerin boyutları küçülmekte, bununla birlikte mikro boyutlarda malzeme işlenebilirliğinin önemi ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve bilgi birikimi sayesinde elektronik ve medikal sektöründe yoğun olarak kullanılan polimer ve takviyeli polimer kompozit malzemeler üzerinde uzun ve kısa atım süreli lazerle açılan mikro boyutlardaki delikler için uygun lazer parametreleri elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Goca, N., “Optik”, Çeviri: Çakır, C., *Kültür Eğitim Vakfı*, 392-438, (1996)
2. Steen, W., M., “Laser Material Processing”, *Springer-Verlag*, 2-11, (1991)
3. Silfast, W., T., “Laser Fundamentals”, First Edition, *Cambridge University*, 1-4, 82-190, (1996)
4. Akman, E., “Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, 3, (2006)
5. Candan, L., Demir, A. and Akman, E., “Effect of Pulsed Nd:YAG Laser Powers On 304 Stainless Steel Welding”, *Sixth International Conference of The Balkan Union BPU-6*, (2006)
6. Rizvi, N., Milne, D., Rumsby, P. and Gower, M., 2000, *Laser Micromachining - New Development and Applications* [online], <http://www.exitechinc.com>, (**Ziyaret tarihi: 9 Ekim 2006**)
7. *History of Lasers* [online], 2006, Bylaser Australia, <http://www.bylaser.com.au/live/content/view/3/3/> , (**Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2006**)
8. *Lazer Gelişiminin Tarihçesi* [online], 2006, Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi, <http://laturum.kou.edu.tr/dokumanlar.html>, (**Ziyaret tarihi: 20 Nisan 2006**)
9. Lamb, W., E., “Fine Structure of The Hydrogen Atom”, *Nobel Lecture*, 287-294, (1955)
10. Townes, C., H., “Production of coherent radiation by atoms and molecules”, *Nobel Lecture*, 58-86, (1964)
11. Schawlow, A., L. and Townes, C., H., “Infrared and Optical Masers”, *Physical Review*, 112, 1940-1949, (1958)
12. *Laser Wavelength Charts* [online], 2008, Lexel Laser, http://www.lexellaser.com/techinfo_wavelengths.htm, (**Ziyaret tarihi: 23 Mayıs 2008**)
13. *Stimulated Emission in a Laser Cavity* [online], 2006, Molecular Expressions, <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/lasers/heliumneonlaser/index.html>, (**Ziyaret tarihi: 15 Şubat 2006**)

14. Majumdar, J., D., Manna, I., “Laser Processing of Materials”, *Sadhana Vol. 28, Parts 3 & 4*, 495 – 562, (2003)
15. Charschan, S., S., “Guide to Laser Materials Processing”, *Laser Institute of America*, 44-55, (1993)
16. Han, W., “Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging”, Doktora Tezi, *Worcester Polytechnic Institute*, (2004)
17. Duley, W., W., “Laser welding”, *John Wiley & Sons, Inc.*, 71-73, (1999)
18. Weckman, D., C., Kerr, H., W., Liu, J., T., “The Effects of Process Variables on Pulsed Nd:YAG Laser Spot Welds”, *Metall. Trans. B.*, 28B, 687-700, (1997)
19. Zhang Y., Li L., Zhang G., “Spectroscopic Measurements Of Plasma Inside The Keyhole In Deep Penetration Laser Welding”, *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 38, 703–710, (2005)
20. Beersiek, J., “On-line Monitoring of Key Hole Instabilities During laser Beam Welding”, *Prometec GmbH, Aachen, Germany, ICALEO’99, welding monitor*, (2000)
21. *Combined Research and Curriculum Development Nontraditional Manufacturing (NTM) - Laser Machining Processes* [online], 2007, <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/>, (Ziyaret Tarihi: 14 Haziran 2007)
22. Tokarev, V., N., Lopez, J., Lazare, “Modelling of High-Aspect Ratio Microdrilling of Polymers With UV Laser Ablation”, *Applied Surface Science*, 168, 75-78, (2000)
23. Tokarev, V., N., Lopez, J., Lazare, S., Weisbuch, F., “High-Aspect-Ratio Microdrilling Of Polymers With UV Laser Ablation: Experiment With Analytical Model”, *Applied Physics A - Materials Science & Processing*, 76, 385-396, (2003)
24. Verhoeven J., C., J., “Modelling Laser Percussion Drilling”, Doktora Tezi, *Technische Universiteit Eindhoven*, (2004)
25. Yalukova, O., Sárady, I., “Investigation Of Interaction Mechanisms In Laser Drilling Of Thermoplastic And Thermoset Polymers Using Different Wavelengths”, *Composites Science and Technology* 66, 1289 – 1296, (2006)
26. Kaçar, E., Mutlu, M., Akman, E., Demir, A., Candan, L., Canel, T., Günay, V., Sınmazçelik, T., “Characterization of the Drilling Alumina Ceramic Using Nd: YAG Pulsed Laser”, “*Material Processing Technology*”, (2008)
27. Lazare, S., Lopez, J., Weisbuch, F., “High-aspect-ratio microdrilling in polymeric materials with intense KrF laser radiation”, *Appl. Phys. A* 69 [Suppl.], S1–S6 (1999)

28. Duley, W., W., "Laser welding", *John Wiley & Sons, Inc.*, 71-73, (1999)
29. *Polimerlerin Sınıflandırılması* [online], 2007, YILFEN, <http://www.yilfen.com/polimer3.htm>, (Ziyaret tarihi: 15 Ekim 2007)
30. Schimidt, M.J.J., Low, D.K.Y., Li, L., "Lazer ablation of a B4C-polysiloxane composite" *Applied Surface Science*, 186:271-275 (2002)
31. Slocombe, A., LiLazer, L., "Ablation Machining Of Metalrpolymer Composite Materials", *Applied Surface Science*, 154-155, 617-621 (2000)
32. Cenna, A. A. and Mathew, P., "Evaluation Of Cut Quality Of Fibre Reinforced Plastics", *Int. J. Much. Tools Manufact.*, Vol. 37, No. 6, pp. 723-736, (1997)
33. Mathew, J., Goswami, G.L., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., "Parametric Studies On Pulsed Nd:Yag Lazer Cutting Of Carbon Fibre Reinforced Plastic Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, 198-203 (1999)
34. Rodden, W. S. O., Kudesia, S. S., Hand, D. P., Jones, J.D.C., "A Comprehensive Study Of The Long Pulse Nd:Yag Lazer Drilling Of Multi-Layer Carbon Fibre Composites", *Optics Communications*, 210: 319-328 (2002)
35. Young, T., Driscoll, D. O., "Impact Of Nd-Yag Lazer Drilled Holes On The Strength And Stiffness Of Laminar Flow Carbon Fiber Reinforced Composite Panels", *Composites Part A* 33:1-9 (2002)
36. Pan, C.T., Hocheng, H., "Evaluation of anisotropic thermal conductivity for unidirectional FRP in lazer machining", *Composites: Part A* 32:1657-1667 (2001)
37. Matthams, T.J., Clyne, T.W., "Mechanical Properties Of Long-Fibre Thermoplastic Composites With Lazer Drilled Microperforations Effect Of Perforations In Consolidated Material", *Composites Science and Technology* 59:1169-1180 (1999)
38. Silvain, J. F., Niino, H., Ono, S., Nakaoka, Yabe, A., "Surface Modification Of Elastomerrcarbon Composite By Nd:YAG Lazer And Krf Excimer Lazer Ablation", *Applied Surface Science*, 141: 25-34 (1999)
39. *Metals and Materials for Research and Industry* [online], 2007, GoodFellow, <http://www.goodfellow.com/>, (Ziyaret tarihi: 20 Ekim 2007)
40. Knowles, M. R. H., Rutterford, G., Karnakis, D., Ferguson, A., "Micromachining Of Metals, Ceramics And Polymers Using Nanosecond Lasers", *Int. J. Manuf. Technol.* 33:95-102, (2007)
41. *Metals and Materials for Research and Industry* [online], 2007, GoodFellow, <http://www.goodfellow.com/>, (Ziyaret tarihi: 20 Ekim 2007)

42. Lippert, T., “Laser Application of Polymers”, *Adv Polym Sci*, 168: 51 – 246, (2004)
43. Sperling, L., H., “Introduction to Physical Polymer Science”, Fourth Edition, *Wiley Interscience*, 757 – 815, (2006)

KİŞİSEL YAYINLAR

1. CANDAN, L., DEMİR, A., AKMAN, E., “Effect of Pulsed Nd: YAG Laser Powers on 304 Stainless Steel Welding”, ***Balkan Physics Conference Proceeding AIP***, 311-312, (2007).
2. AKMAN, E., ATALAY, B., CANDAN, L., CANEL, T., DEMİR, A., DEMİR, P., ERTURK, S., GENÇ, B., KACAR, E., KENAR, N., KOYMEN, E., MUTLU, M., SINMAZCELİK, T., URHAN, O., Progresses on the Theoretical and Experimental Studies in Laser Technologies Research and Application Center in Kocaeli, ***Balkan Physics Conference Proceeding AIP***, 331-332, (2007).
3. KACAR, E., MUTLU, M., AKMAN, E., DEMİR, A., CANDAN, L., CANEL, T., GUNAY, V., SINMAZCELİK, T., "Characterization of the Drilling Alumina Ceramic Using Nd:YAG Pulsed Laser", ***Journal of Material Processing Technologies***, (2008), in press.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Bursa’da doğdu. 1986 yılında Kars ilinde başladığı ilköğrenimini Karakurt İlkokulu ve Karakurt Ortaokulu’nda tamamladı. 1994 yılında başladığı lise öğrenimini Kars Sarıkamış Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’nden 2004 yılında Fizikçi olarak mezun oldu.