

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOSANİYE LAZER KULLANARAK PVC MALZEME
ÜZERİNDE MİKRO ÖLÇEKLİ DELİKLERİN OPTİMUM
PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODU İLE
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS

Bekir ÇELİK

Anabilim Dalı: FİZİK

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Timur CANEL

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**NANOSANİYE LAZER KULLANARAK PVC MALZEME
ÜZERİNDE MİKRO ÖLÇEKLİ DELİKLERİN OPTİMUM
PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODU İLE
BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bekir ÇELİK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 03 Haziran 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 20 Temmuz 2011

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Timar ÇANEL

(.....)

Üye

Doç.Dr.Erdoğan TARCAN

(.....)

Üye

Yrd.Doç.Dr.Serço Serkis YEŞİLKAYA

(.....)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Çok geniş kullanım alanına sahip olan polimer malzemelerin kullarımdaki bir çok avantajına karşın mikro boyutta işlenmesinde çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Düşük camsı geçiş ve erime sıcaklıkları nedeniyle polimerlerin mekanik yöntemlerle mikro boyutta işlenmesinde görülen zorluklardan dolayı lazerle polimer işleme önem kazanmıştır. Taguchi Yöntemi PVC'nin lazerle delinmesinde kullanılan parametrelerin belirlenmesinde, zaman ve maliyet kazancı sağladığı için tercih edilmiştir.

Tez çalışmam sırasında bana büyük destek veren ve çalışma imkanı sunan çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Timur CANEL'e ve bana LAtARUM'da sağladığı tüm imkanlardan ve yönlendirmelerinden dolayı sayın hocam Prof. Dr. Arif DEMİR'e teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım esnasında yardımlarını hiç esirgemeyen ve bana çok yardımcı olan değerli Arş.Gör.Dr. Uğur KAYA'ya ve yardımlarından dolayı Arş.Gör. Ufuk ABACI'ya ve Uzm. Erhan AKMAN'a teşekkür ediyorum.

Çalışma hayatım boyunca sürekli yanımda olduğunu düşündüğüm aileme ve özellikle eşim ve biricik kızıma sonsuz sevgilerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vii
ÖZET	viii
İNGİLİZCE ÖZET	ix
1. GİRİŞ	1
2. LAZERLER	3
2.1. Lazerin tarihçesi	3
2.2. Lazer ve çeşitleri	5
2.2.1. Lazer	5
2.2.2. Lazerlerin temel özellikleri	8
2.2.3. Lazer çeşitleri	8
2.2.3.1. Kazanç ortamlarına göre lazer çeşitleri	9
2.2.3.2. Yayılımlarına göre lazerler	11
2.2.3.3. Dalgaboylarına göre lazerler	12
2.3. Lazerin kullanım alanları	12
2.3.1. Endüstrideki kullanım alanları	12
2.3.2. Bilimsel araştırmalardaki uygulamaları	13
2.3.3. Haberleşme alanındaki uygulamaları	13
2.3.4. Tıp alanındaki uygulamaları	13
2.3.5. Askeri alandaki uygulamaları	13
2.4. Lazer güvenliği	14
2.5. Lazerle ilgili beklenen gelişmeler	15
3. LAZERLE MALZEME İŞLEME	16
3.1. Giriş	16
3.2. Lazerle malzeme işleme teknikleri	16
3.3. Işığın malzeme ile etkileşmesi	18
3.4. Lazerle delme işlemi	19
3.4.1. Lazerle delmenin kullanım alanları	20
3.4.2. Lazerle delmenin diğer yöntemlerden farkı	20
3.4.3. Lazerle delik oluşum süreci	21
3.4.3.1. Lazerle delik delme teknikleri	24
3.4.3.2. İdeal delik ve delik modellemesi	25
3.4.4. Lazerle delmeyi etkileyen parametreler	30
4. POLİMERLER VE PVC	32
4.1. Polimerler	32
4.2. Polimerlerin özellikleri	36
4.2.1. Polimerlerin optik özellikleri	36
4.2.2. Polimerlerde renksizlik ve şeffaflık	36
4.3. PVC (Poly Vinyl Chloride)	37
4.3.1. PVC'nin genel özellikleri	38

4.3.2. PVC'nin kullanım alanları.....	40
5. NANOSANİYE LAZER İLE PVC ÜZERİNDE MİKRO ÖLÇEKLİ DELİK ELDE EDİLMESİ.....	41
5.1. Deneysel çalışma, ölçüm ve gözlemler	44
6. PVC'NİN LAZERLE DELİNMESİNDE OPTİMUM PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODU İLE BELİRLENMESİ.....	52
6.1. Giriş	52
6.2. Taguchi Metodu.....	52
6.2.1. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi.....	55
6.2.2. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi.....	55
6.2.3. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı	57
6.2.4. Deney sonuçlarının Taguchi Metodu ile optimizasyonu.....	59
6.2.4.1. Varyans analizi (Anova).....	60
6.2.4.2. Sonuçların optimizasyonu	61
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	64
KAYNAKLAR.....	66
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Elektromanyetik spektrum.....	5
Şekil 2.2: Enerji seviyesi diyagramı	6
Şekil 2.3: Enerji tamam lazer sistemi	7
Şekil 2.4: Yarıiletken diyot lazer (GaAs)	10
Şekil 3.1: Bir tabakadan ışığın soğurularak geçişi.....	19
Şekil 3.2: Sıcaklık – Zaman değişim noktaları.....	23
Şekil 3.3: Yüksek şiddetli lazer atımı fiziksel süreçlerinin şematik gösterimi	24
Şekil 3.4: Lazerle delme teknikleri.....	25
Şekil 3.5: İdeal bir delik şekli.....	25
Şekil 3.6 : Lazerle oluşturulmuş basit bir delik şeması	26
Şekil 3.7: Yüksek şiddetli ışının elde edilmesi için optik düzenek	27
Şekil 3.8: Delik profili	28
Şekil 3.9: Enerji yoğunluğu ile derinlik arasındaki değişim	30
Şekil 3.10: Lazerle delme kalitesini etkileyen parametreler	31
Şekil 4.1: İki monomerden meydana gelen kopolimerin değişik düzenlemeleri	32
Şekil 4.2: Polimer moleküllerinde ortaya çıkabilecek dallanma tipleri.....	33
Şekil 4.3 : Polimer polietilen zincir kovalent bağları	34
Şekil 4.4: Polimer polietilen zincirleri.....	34
Şekil 4.5: Naylon6 polimer zincirleri.....	34
Şekil 4.6: Polimer zincirleri.....	35
Şekil 4.7: Yarı- kristalin bir polimerin yapısı	35
Şekil 4.8: PVC oluşumu	38
Şekil 5.1: Atmosfer basınçlı ortam görünümü	42
Şekil 5.2: Lazer mod görüntüsü.....	42
Şekil 5.3: Odaklama sistemi	43
Şekil 5.4: Atım sayısının derinliğe etkisi	44
Şekil 5.5: 1 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	46
Şekil 5.6: 2 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	46
Şekil 5.7: 3 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	46
Şekil 5.8: 4 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	46
Şekil 5.9: 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	47
Şekil 5.10: 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	47
Şekil 5.11: 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	47
Şekil 5.12: 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	47
Şekil 5.13: 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 5.14: 1 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 5.15: 2 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 5.16: 3 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	48
Şekil 5.17: 4 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	49
Şekil 5.18: 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	49
Şekil 5.19: 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	49
Şekil 5.20: 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	49
Şekil 5.21: 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	50

Şekil 5.22: 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri	50
Şekil 6.1: Kavitenin optik mikroskop görüntüleri.	63
Şekil 6.2: PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü.....	63

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1:Lazerin tarihi gelişimi	3
Tablo 3.1: Lazerle delik delme yönteminin karşılaştırılması.....	21
Tablo 3.2: Polimer zincirinin bağlarını kırmak için gerekli foton enerjisi ve dalga boyu	22
Tablo 4.1: PVC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
Tablo 5.1: 3 Harmoniğe sahip atımlı Surelite 3 Nd:YAG lazerinin özellikleri	41
Tablo 5.2: Deneylerdeki parametreler ve seviyeler.....	45
Tablo 5.3 : Deney seviyelerinin deney numaralarına göre dağılımı.....	45
Tablo 5.4: Şekil 5.5'ten Şekil 5.22'ye kadar olan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak hesaplanan kavite derinlikleri ve genişlikleri.	50
Tablo 5.5: Tablo 5.4'ten elde edilen ortalama derinlik-genişlik oranları.	51
Tablo 6.1: Deneylerdeki faktörler ve seviyeler.....	55
Tablo 6.2: L ₉ ortogonal dizini.	56
Tablo 6.3 : Taguchi L ₉ ortogonal dizini.....	57
Tablo 6.4: Taguchi L ₉ deney tasarımına göre deney sonuçları ve S/N oranı.....	58
Tablo 6.5: Faktör seviyelerinin ortalama S/N oranları.....	59
Tablo 6.6: Taguchi L ₉ deney tasarımına göre Anova tablosu.....	61
Tablo 6.7: Taguchi Metoduyla elde edilen optimum seviye ve değerlerin kıyaslanması.	63

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

t	: Zaman
I	: Işıma şiddeti
h	: Planck sabiti
T	: Sıcaklık
c	: Işık hızı
α	: Soğurma katsayısı
λ	: Dalgaboyu
L	: Rezonatör aynaları arasındaki mesafe
θ	: Sapma açısı
F_t	: Ablasyon eşiği
Ae_{ff}	: Yüzeyin soğurganlığı
$F(r,z)$: Enerji yoğunluğu
E_1	: Alt enerji seviyesi
E_2	: Üst enerji seviyesi
ΔE	: İki seviye arası enerji farkı
T_m	: Erime noktası
T_i	: Ortam sıcaklığı
C	: Isı kapasitesi
ρ	: Yoğunluk
φ	: Teğet açısı
SS_T	: Toplam karelerin toplamı
η	: Sinyal/Gürültü (S/N) oranı
$h(F)$: Delik derinliği
F	: Soğrulan ışımaya
γ	: Polimerin soğurma katsayısı

NANOSANIYE LAZER KULLANARAK PVC MALZEME ÜZERİNDE MİKRO ÖLÇEKLİ DELİKLERİN OPTİMUM PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODU İLE BELİRLENMESİ

Bekir ÇELİK

Anahtar kelimeler: Lazerle malzeme işleme , lazer ile delme, Taguchi Metodu, PVC.

Özet: Lazerin parametrelerinin uygun şekilde değiştirilmesi ile birçok farklı malzemenin işlenebilmesi mümkündür. Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlardaki uygulamalarda zamanla daha çok kullanım yeri bulmuştur. Lazerle mikro düzeyde malzeme işleme, yarıiletkenler, elektronik, medikal, otomotiv, uçak ve haberleşme endüstrilerinde kullanılmaktadır. PVC malzeme, kullanım alanının genişliliğinden dolayı bu çalışmada kullanılmıştır. PVC'nin lazerle delinmesinde, ideal delik için en uygun parametreler ile delinmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin tespiti için, son zamanlarda bir çok deneyde uygulanan Taguchi Metodu kullanılmıştır. Bu metot ile en uygun parametreler daha az deney ile belirlenmiştir. Bu da zamandan ve maddi imkanlardan tasarruf sağlamıştır.

**USING NANOSECOND LASER MICRO SIZED HOLES of PVC MATERIAL
on THE TAGUCHI METHOD for THE DETERMINATION of THE
OPTIMUM PARAMETERS**

Bekir ÇELİK

Keywords: Micromachining of materials with laser, drilling by laser, Taguchi method, PVC.

Abstract: It is possible to process different materials by changing laser parameters. Lasers have wide application area such as industry; scientific research, communication, medical science and military. Lasers are used in micro size material processing, semiconductors, electronics, medical, automotive, aircraft and communication industries. PVC is used in this study because of wide field of applications. PVC has to be drilled with the appropriate parameters to achieve the ideal hole. For the determination of these parameters, Taguchi method which used a lot lately in experiments has been used, with these method optimal experimental parameters determined by less number of experiments. This also provides to reduce time and cost during work.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasının amacı PVC'nin lazerle delme işleminde, en iyi derinlik genişlik oranının elde edilmesi için uygun parametrelerin Taguchi Metodu ile tespit edilmesidir. Çalışmanın deneysel kısmında lazerle delinen PVC'deki deliklerde yüksek derinlik-genişlik oranı elde etmek istendiği için termal etki istenmeyen bir durumdur. Delik civarında yanma oluştuğu zaman hem derinlik-genişlik oranında istenilen değerlere hem de oluşan pürüzlülüğün dolayısıyla istenilen delik kalitesine ulaşamamaktadır.

Bölüm 2'de deney çalışmasında kullanılan lazerle ilgili; lazerin tarihi gelişimi, lazerin fiziksel temeli, lazer çeşitleri, lazer uygulamaları, lazer güvenliği ve lazerle ilgili beklenen gelişmeler hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3'de lazerle delmenin teorik kısmı anlatılmıştır. Bu bölümde ilk önce lazerle malzeme işleme teknikleri ve lazer ışınının malzeme ile etkileşiminden bahsedilmiştir. Ayrıca lazerle malzeme etkileşimi sırasında gerçekleşen fiziksel olaylar, lazerler ile gerçekleştirilen delme teknikleri, lazerle delmeyi etkileyen parametreler, ideal delik özellikleri ve lazerle delmenin diğer yöntemlerden farkı hakkında bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 4'de deneysel çalışmada kullanılan malzeme hakkında teorik bilgi verilmiştir. İlk olarak deneysel çalışmada kullanılan PVC malzeme, polimer sınıf malzemelere dahil olduğu için polimerler ve özellikleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra PVC'nin özellikleri, çeşitleri ve kullanım alanları hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 5'de nanosaniye lazer ile PVC üzerinde delik elde edilmesinin deneysel kısmı yer almaktadır. Bu bölümde lazerle delme esnasında oluşan deliklerin derinlikleri ve genişlikleri ayrı ayrı her deneyin derinlik-genişlik oranları hesaplanmıştır. Ayrıca her deney sonucu elde edilen deliklerin optik mikroskop görüntüleri de şekillerle

gösterilmiştir. Bu optik mikroskop görüntüleri kullanılarak deliklerin derinlik- genişlik oranları hesaplanmıştır.

Bölüm 6'da deney tasarım yöntemlerinden kısaca bahsedildikten sonra, günümüzde hızla gelişen en iyi deney tasarım metotlarından biri olan Taguchi Metodu hakkında bilgiler verilmiştir. Taguchi Metodu ile belirlenen lazerle delme parametreleri ve bu parametreler kullanılarak varyans (Anova) metodu ile elde edilen optimum lazerle delme parametrelerinin nasıl bulunduğu anlatılmıştır. Bulunan optimum parametreler ile yapılan hesaplama sonucu ortaya çıkan derinlik- genişlik oranları ve son yapılan doğrulama deneyi sonuçları karşılaştırılmış.

Bölüm 7'de yapılan deney ve çalışmaların sonuçları özetlenerek, bu yöntemin avantajlarından ve gelecekteki uygulamalarından bahsedilmiştir.

2. LAZERLER

2.1. Lazerin tarihçesi

Lazer sisteminin temelleri ilk olarak 1917 yılında Albert EINSTEIN tarafından bir matematiksel ispat kullanılarak öngörülen “uyarılmış yayılma” kavramıyla atılmıştır [1,2]. Daha sonra Lazer günümüze kadar gelişerek ilerlemiştir. Lazerdeki tarihi gelişim aşağıdaki tabloda sıralanmıştır.

Tablo 2.1:Lazerin tarihi gelişimi [3].

LAZER GELİŞİMİNİN TARİHÇESİ		
Tarih	Adı	Başarılan konu
1916	Albert Einstein	Işığın yayılma teorisi. Uyarılmış ışımaya kavramı.
1928	Rudolph W Landenburg	Uyarılmış ışımamanın varlığının kanıtlanması ve Negatif soğurma.
1940	Valentin A Fabrikant	Sayı yoğunluğu tersiniminin olma olasılığı.
1947	Willis E Lamb R C Retherford	Hidrojen spektrumunda indüklenmiş ışımaya şüphesi. Uyarılmış ışımamanın ilk gösterimi.
1951	Charles H Townes	Kolombiya Üniversitesi'nde mazer (Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation) keşfi- Uyarılmış ışımaya dayanan ilk alet ile 1964 Nobel ödülünü kazandı.
1951	Joseph Weber	Maryland Üniversitesi'nde mazer bağımsız olarak keşfedildi.
1951	Alexander Prokhorov Nikolai G Basov	Moskova'da Lebedev laboratuvarlarında mazer bağımsız olarak keşfedildi. 1964 Nobel ödülünü kazandı.
1954	Robert H Dicke	"Optik Bomba" patenti. Atımlı sayı yoğunluğu tersinimine dayanan süper-ışımaya ve “Moleküler Kuvvetlenme ve Üretim Sistemi” için parçalı Fabry-Perot rezonans çemberi.
1956	Nicolas Bloembergen	Harvard Üniversitesinde üç-seviyeli katı hal mazer tasarımı.
1957	Gordon Gould	Bir lazer tanımlayan ilk doküman. 1970'lerde Patent şartlarında yaratıldı.
1958	Arthur L Schawlow Charles H Townes	"Optik Mazer"i tanımlayan ilk ayrıntılı makale. Kolombiya üniversitesinde yapılan ilk lazer keşfi ile yaratıldı.

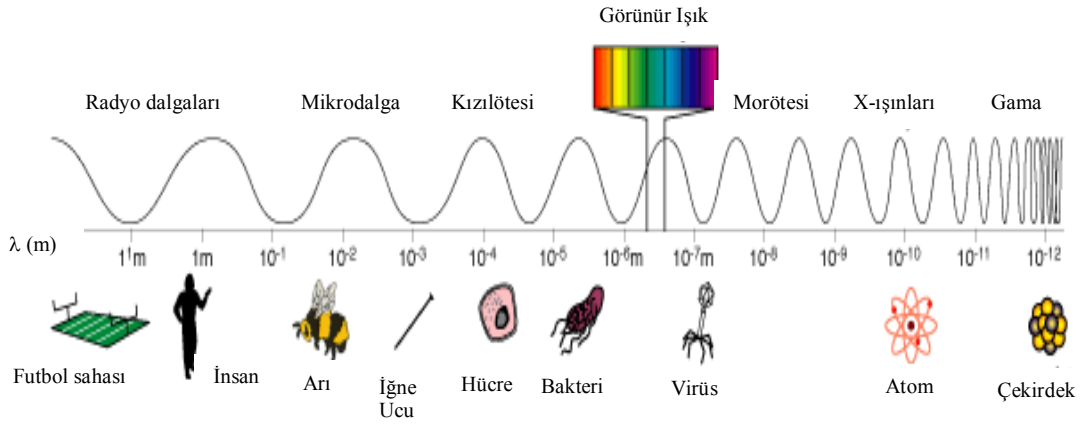
Tablo 2.1: (Devamı) Lazerin tarihi gelişimi [3].

Tarih	Adı	Başarılan konu
1960	Arthur L Schawlow Charles H Townes	Lazer Patent No. 2,929,922.
1960	Theodore Maiman	Yakut (ruby) kristali ile yapılan ilk çalışan lazer'in keşfi. 16 Mayıs 1960, Hughes Araştırma Laboratuvarları.
1960	Peter P Sorokin Mirek Stevenson	İlk Uranyum lazer – yapılan lazerlerin ikincisi. Kasım 1960 IBM Laboratuvarları.
1961	A G Fox and T Li	Bell Laboratuvarlarında optik rezonatörlerin teorik analizleri.
1961	Ali Javan William Bennet Jr. Donald Herriot	Bell Laboratuvarlarında Helyum Neon (HeNe) lazer'in keşfi.
1962	Robert Hall	General Elektrik Laboratuvarlarında yarı-iletken lazer'in keşfi.
1964	J E Geusic H M Markos L G Van Uiteit	Bell Laboratuvarlarında ilk çalışan Nd:YAG lazer'in keşfi.
1964	Kumar N Patel	Bell Laboratuvarlarında CO2 lazer'in keşfi.
1964	William Bridges	Hughes Laboratuvarlarında Argon İyon lazer'in keşfi.
1965	George Pimentel J V V Kasper	Kaliforniya Üniversitesi Berkley'de ilk kimyasal lazer
1966	William Silfvast Grant Fowles and Hopkins	Utah Üniversitesinde ilk metal buhar lazer – Zn/Cd
1966	Peter Sorokin, John Lankard	IBM Laboratuvarlarında ilk boya lazer etkisinin gözlenmesi.
1969	G M Delco	Otomobil uygulamaları için üçlü lazerlerin ilk endüstriyel donanım.
1970	Nikolai Basov's Group	Moskova Lebedev Laboratuvarlarında Xenon (Xe) ile yapılan ilk Excimer lazer.
1974	J J Ewing and Charles Brau	Avco Everet Laboratuvarlarında ilk nadir Gaz halojenür excimer.
1977	John M J Madey's Group	Stanford Üniversitesinde ilk serbest elektron lazeri.
1980	Geoffrey Pert's Group	İngilterede Hull Üniversitesinde X-ışını lazer etkisinin ilk raporu.
1981	Arthur Schawlow Nicolas Bloembergen	Linear olmayan optik ve spektroskopide yapılan çalışma için Nobel fizik ödülü.
1984	Dennis Matthew's Group	Lawrence Livermore Laboratuvarlarında X-ışını lazer gözleendiği ilk olarak rapor edildi.

2.2. Lazer ve çeşitleri

2.2.1. Lazer

Dilimizde “lazer” diye adlandırılan laser “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation” ifadesindeki kelimelerin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır. Lazer “Uyarılmış Elektron Radyasyonu ile Yükseltilmiş Işık“ [4] olarak bilinir. Bu alanda bilinen maser ”Microwave (Molecular) Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harfleri kullanılarak adlandırılmıştır. 1953’de A. B. D. ’li fizikçiler C. H. Towness ve A. L. Schawlow mikrodalga frekansına uyarlamaya çalışarak maser’ı gerçekleştirdiler. Temel olarak lazer elektromanyetik alandaki ışık frekanslarında; maser ise mikrodalga frekanslarında çalışır (Şekil 2.1). Maserlerin düşük ısı ve düşük basınç altında çalışan çok düşük enerji seviyelerini kullanan katı (iyon) ve gaz (molekül) olmak üzere iki tipi vardır [5].



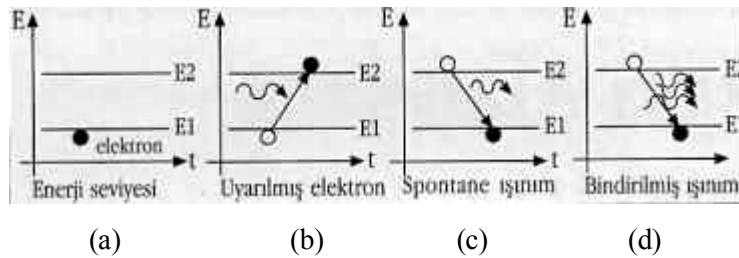
Şekil 2.1: Elektromanyetik spektrum

Beyaz ışık birçok renkten (dalga boyundan) oluşan Polikromatik bir ışık demetidir. Monokromatik ışık ise tek bir renkten oluşmuştur. Birden fazla dalga boyu ihtiva eden güneş ışığı veya bir lambadan yayılan ışık ise eşfazlı olmayan (incoherent) yayılım yapar ve yayıldığı mesafeye bağlı olarak şiddetini kaybeder. Eğer bir rengi diğerlerinden ayırıp kullanmaya kalkarsak, bu da monokromatik bir ışık olur. Fakat eş fazlı olmayan "incoherent" ışık kaynakları olarak adlandırılırlar. Bunlar çeşitli veya tek dalga boyundan oluşan her yöne yayılma/dağılma özelliği gösteren ve

mesafeye bağılı olarak şiddetini çok çabuk kaybeden ışıklardır. Monokromatik bir ışık kaynağını oluşturan ışınların dalgalarının tümünü aynı frekansta ve aynı fazda titreşmesi özelliği gösteren ışıklara eşfazlı "coherent" ışıklar denir. Lazer eşfazlı (coherent) yayılım yapar. Lazerler kızılötesinden (IR) başlayıp X-Işınlarına kadar uzanan ışık şiddeti artırılmış eşfazlı ışınımlardan oluşan ışın demetleridir. Burada eşfazlı ışınım, lazerin aşırı yoğunluğu ve uzun mesafede çok az sapması (ıraksınım) olan saf bir renkte (frekansta) olması anlamındadır. Lazer sistemleri, içerisinde depolanan ışın demetlerini eşfazlı olarak daha güçlü bir saf ışınım olarak yayma özelliğine sahiptirler [5].

Bir atomun iki enerji düzeyi Şekil 2.2'de gösterildiği gibi E_1 ve E_2 olsun ve $E_2 > E_1$ farz edelim. E_1 seviyesinde bulunan elektrona (Şekil 2.2a) dışardan bir foton gönderildiğinde bir üst enerji seviyesine (uyarılmış elektron) çıkacaktır (Şekil 2.2b). Minimum enerji ilkesine göre atom veya moleküller düşük enerji seviyesinde olmak istediklerinden E_2 seviyesindeki elektron kendiliğinden E_1 seviyesine inecektir (Spontane ışınım) (Şekil 2.2c). Bu sırada enerjisi $E_2 - E_1 = h\nu$ olan bir foton salar. Burada ν fotonun frekansıdır. Eğer elektron bu salınımı kendiliğinden yaparsa salınan fotonun yönü tamamen rasgeledir [3].

Ancak eğer E_2 düzeyinde ki elektron $E_2 - E_1$ enerjisindeki başka bir fotonla etkileşerek E_1 düzeyine inerse bu şekilde salınan fotonun yönü ve fazı geçişe etki eden fotonla aynı olacaktır. Bu ikinci geçiş biçimine uyarılmış salınım (Stimulated Emission) denir (Şekil 2.2d) ve lazerin çalışmasının ana ilkesidir [3].

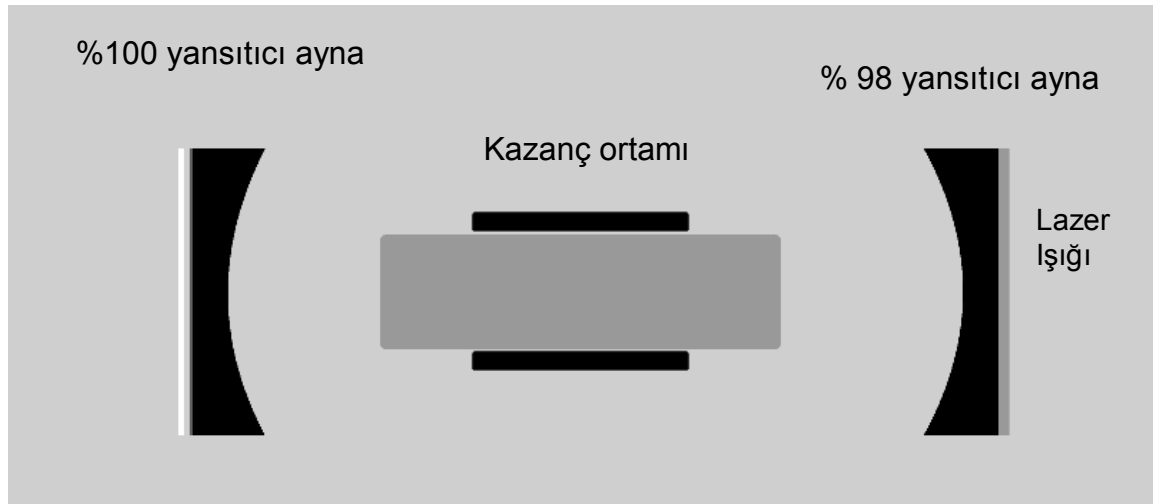


Şekil 2.2: Enerji seviyesi diyagramı [5].

Lazer ışığı dört anahtar elemandan oluşur. İlk olarak, bir atom topluluğu veya başka maddeler içine yöneltilen bir ışık sinyalinin yükseltirler. Yükseltici madde genelde, şiddetlendirilmiş ışığı içinde tutacak ve tekrarlı şiddetlendirme için tekrar ortama

sokacak olan oldukça yüksek mertebeli yansıtıcı bir rezonatör ile kuşatılır. Işık enerjisine çevrilen yükselticinin enerjisinin bir yolla yenilenme zorunluluğu bulunmaktadır. Rezonatörde depolanan enerjinin en azından bir kısmının, Şekil 2.3'de olduğu gibi, bir yolla sistemden dışarıya alınabilmesi için bir yöntem bulunmalıdır [6].

İyi ayarlanmış bir lazerin dikkatli ayarlanmış bir kayıp ve kazançta sahip olmak zorunda olduğu açıktır. Bütün lazer sistemlerinin kazançtan çok kayıp mekanizasyonlarına sahiptir. Lazerler temel fizik kanunlarına uyarlar ve lazerlerin kazanç ortamına enerji sokulmasından rezonatör ortamından ışık alınmasına kadar olan bütün aşamaları enerji kayıp ve entropi kazancına açıktır [6].



Şekil 2.3: Enerji girişi, yükseltme ve çıkışından sorumlu elemanları gösteren bir tamam lazer sistemi [6].

Rezonatörlerdeki atomların davranışını anlamadaki ilk ciddi yaklaşım, rezonatör tasarlayıcısı tarafından kasıtlı olarak sisteme sokulan kuvvetli geri beslemeden doğar. Bu geri besleme, küçük bir girişin, sonsuz olmamak kaydıyla, oldukça kolay bir yolla yükseltebileceği anlamını taşımaktadır. Basit yükseltme sadece rezonatör içindeki ışık alanı atomların davranışını etkileyecek kadar büyük olana kadar gerçekleşecektir. Bundan sonra ışık yükseltici atomlarla etkileştiği sürece ışığın şiddeti kendi şiddetini belirlemede hesaba katılmak zorunda olacaktır. Işığın ve atomların birbirlerine cevabı, bağımsız olarak değil öz uyumlu olacak şekilde ele alınabilecek kadar kuvvetli bir şekilde birbirini bağlı olacaktır. Kuvvetli geri

besleme aynı zamanda küçük katkıların hızlı bir şekilde şiddetlendirileceği anlamını taşır. Bundan dolayı lazerler potansiyel olarak oldukça hataya açık ve kararsız aygıtlardır [6].

2.2.2. Lazerlerin temel özellikleri

a. En büyük özelliği dağılmaz olması ve yön verilebilmesidir. Bu özelliğinden istifade ile mesafe ölçme ve fiber optik teknolojisi geliştirilmiştir. Dalga boyunun küçük olması dağılmayı da büyük ölçüde azaltır. Uyarılan atomlar her yön yerine belli yönlerde hareket ederler. Bu lazer ışınının şiddetli olmasını sağlar.

b. Lazer ışını, dalga boyu tek olduğundan monokromatik özellik taşır. Bu sebepten istenilen frekansta çok sayıda dalgalar lazer dalgası üzerine bindirilmek suretiyle haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü olarak iş görür. Aynı anda birçok bilgi bir yerden başka yere gönderebilir.

c. Lazer ışınının ıraksınımı küçük olduğundan kısa darbeler halinde yayınlanabilmesi mümkündür. Kayıpsız yüksek enerji nakli yapılması bu özelliği ile sağlanabilir. Lazer kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde kesme, kaynak ve delme endüstrisinde kullanılır. Ayrıca lazer darbesinin çok kısa olmasından yüksek hız fotoğrafçılığında faydalanılır. Yönlü bir hareket olmasından ise holografi ve ölçüm biliminde yararlanır. Bütün özellikleri ile uzak mesafe ölçümlerini mümkün kılar.

d. Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür [7].

2.2.3. Lazer çeşitleri

Lazerler, kazanç ortamlarına, yayılımlarına ve dalgaboylarına göre üç farklı şekilde sınıflandırılabilirler.

Kazanç ortamlarına göre:

- Kristal Lazerler
- Yarıiletken Lazerler
- Gaz Lazerler
- Sıvı Lazerler

Yayımlarına göre:

- Sürekli Dalga (Continuous Wave)
- Atımlı Lazerler (Pulsed Lazer)

Dalgaboylarına göre:

- X-Işımı Bölgesi
- Morötesi (Ultraviolet)
- Görünür Bölge
- Kızılötesi (Infrared)
- Mikrodalga

2.2.3.1. Kazanç ortamlarına göre lazer çeşitleri

a) Katıhal (kristal) Lazerler

İlk bulunan lazer yakut lazeridir. Yakut, az miktarda krom ihtiva eden alüminyum oksit kristalidir. Kırmızı lazer ışınları yayan, bu kristal içindeki krom atomlarıdır. Krom atomları optik olarak yeşil ve mor ışıkla uyarılır. Bu tür lazer ile saniyenin milyarda biri gibi kısa bir sürede birkaç milyon watt'lık güç nakledilebilir. İlk yakut lazer sadece bir darbe ile çalıştırılırdı. Daha sonra bunun oda sıcaklığında ve sürekli biçimde çalıştırılması mümkün olmuştur. Darbenin gücünün yükseltildiği ikincil lazerlerle birlikte kullanılan q-anahtarlı lazer moduyla saniyenin birkaç milyarda biri kadar devam eden birkaç milyar watt'lık güç üretilebilir. Günümüzde kullanılan lazer, sert şeffaf kristalden meydana gelir. Kristalde küçük miktarda genellikle nadir toprak elementleri mevcuttur. Bu kristalin işlem için oda sıcaklığının çok altına indirilmesi gerekir. Bu lazerler optik pompalama gerektirirler ve darbeleri olarak çalışarak ısınmayı önlerler. Sıcaklık ve manyetik alanda yapılacak değişikliklerle çalışma frekansı ayarlanabilir [7].

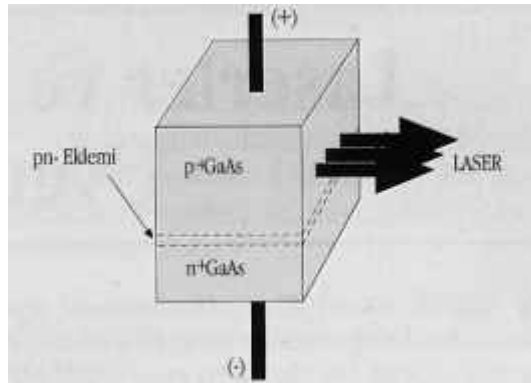
Bazı katıhal lazerlerine örnek verecek olursak:

- Ruby Lazer
- Nd-Yag ve Nd-Glass Lazer

- Renk Lazeri
- Alexandrite Lazer
- Ti-Safir Lazer

b) Yarı iletken lazerler

Yarı iletken malzemelerden elde edilen kristallerle de lazer yapılmıştır. Galyum arsenik kristali yarı iletken lazere örnektir. Yarı iletken diyot gibi p-n malzemenin birleşmesinden meydana gelmiş olup, p-n malzemenin birleştiği yüzey yakut lazerindeki aynalar görevini yapar. Birleşim yüzeyinde pozitif voltaj p tarafına ve negatif voltaj n tarafına verildiği zaman elektronlar n malzemesinden p malzemesine geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonlar tekrar elektronlara çarparak bu elektronların daha çok foton üretmesine sebep olurlar. Neticede yeterli seviyeye ulaşan foton neşri, lazer ışını meydana getirmiş olur. Bu tür lazerler verimli ışık kaynaklarıdır. Genellikle boyları bir milimetreden büyük değildir. Ancak çok verimli çalışma için ortam sıcaklığı oda sıcaklığının çok altına düşürülmelidir [7]. Bu alanda Gallium Arsenide en çok kullanılan yarıiletken lazere [5].



Şekil 2.4: Yarıiletken diyot lazer (GaAs) [5].

c) Gaz lazerler:

1) Atom lazerler:

Asal gaz (He, Kr, Ne, Ar, Xe)

Metal buharı (Pb, Sn, Zn, Cd)

2) İyon lazerler:

Asal elementli (He, Kr, Ne, Ar, Xe)

Metal buharlı (Pb, Sn, Zn, Cd)

3) Molekül lazerler: (CO, CO₂, N₂, CH₃F, ...) [5].

İlk gaz lazer helyum ve neon karışımı şeklinde kullanılmıştır. bu karışım uzun bir tüpe ve iki küresel ayna arasına yerleştirilmiştir. Helyum ve neon gazı ile çalışan lazerde bu gazlar yüksek voltaj altında iyonize hale gelir. Helyum atomları elektrik deşarjı esnasında elektronların çarpması ile uyarılarak yüksek enerji seviyelerine çıkar. Bunlar, kazandıkları enerjilerini neon atomlarındaki eş enerji seviyelerine aktarırlar. Bu enerji aktarma işlemi fotonun yayılmasına sebep olur. Aynalar vasıtasıyla yeterli seviyeye ulaştıktan sonra lazer ışını elde edilmiş olur. Bu tür lazer ışınının dalga boyu 1,15 mikrondur [7].

d) Sıvı lazerler

En çok kullanılan sıvı lazer türü, organik bir çözücü içindeki organik boyanın seyreltik bir çözeltisidir. Bunlara mor ötesine yakın ve kızılötesine yakın arasında lazer türleri elde edilebilir. Genellikle pompalama optik olarak cereyan eder. Birkaç lazer paralel olarak çalıştırılabilir. Böylece saniyenin birkaç trilyonda biri devam eden lazer darbeleri elde edilebilir. Boya lazerlerinin en önemli özelliği dalga boyunun geniş bir alanda hassas bir şekilde ayarlanabilmesidir [7]. Örnek olarak en önemli bilinen solüsyon Rhodamine 6G'dir. Az asidik bir solüsyon olan 4-Methylum Belliferone 0,391µm'den 0,567µm'ye kadar olan spektrumda dalga yaymaktadır. Bir monokromatör üzerinden geçirilerek çeşitli maddelerin analizlerini yapmakta kullanılır [5].

2.2.3.2. Yayılımlarına göre lazerler

a) Sürekli dalga (Continuous Wave)

Sürekli lazerlerde lazer ışını kesintisiz olarak elde edilmektedir. Enerjinin devamlı olması termal yan etkiler gibi bazı etkileri de beraberinde getirebilmektedir. Maddelerde yapı bozukluklarına sebep olurlar. Buradan da anlaşılacağı üzere sürekli

lazerler daha çok tahrip amaçlı olup silah sistemlerinde tercih edilir. Malzeme işlemede tercih edilmezler.

b) Atımlı lazerler (Pulsed lazer)

Lazer ışını mekanik olarak istenilen aralıklarla kesilebilmektedir. Atımlı lazerler atım süresine göre pikosaniye, femtosaniye, nanosaniye ve milisaniye olarak çeşitlere ayrılırlar. Böyle atımlı lazerlerde lazer enerjisinin düzeneğin içinde belirli bir birikimden sonra daha yoğun bir biçimde verilebilmektedir. Bu atımların süresinin azalması ile daha fazla güç elde edilir. Daha çok malzeme işlemede kullanılırlar.

2.2.3.3. Dalgaboylarına göre lazerler

- a) X-Işını Bölgesi : Dalga boyları 0.01 nm ile 10 nm arasında olan lazerlerdir.
- b) Morötesi (UV) : Dalga boyları 10 nm ile 310 nm arasında olan lazerlerdir.
- c) Görünür bölge : Dalga boyları 400 nm ile 700 nm arasında olan lazerlerdir.
- d) Kızılötesi (IR) : Dalga boyları 710 nm ile 1.0 mm arasında olan lazerlerdir.
- e) Mikrodalga : Dalga boyları 1.0 mm ile 1.0 m arasında olan lazerlerdir.

2.3. Lazerin kullanım alanları

Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda ki uygulamalarda gün geçtikçe daha çok kullanılmaktadır. Lazerler ilerleyen yıllarda kullanımda ki kolaylıktan ve ölçümde ki hassasiyet den dolayı daha çok kullanım alanı bulacaktır.

2.3.1. Endüstrideki kullanım alanları

- Her çeşit malzemeye çok hassas bir şekilde kesme, delme, eritme, lehimleme, kaynatma ve şekil verme işlemleri ,
- Mikroelektronikte dirençlerin aktif veya pasif olarak 0,01% hassasiyetinde üretilmeleri,
- Chip üretiminde hat kalınlıklarının 0,25 μm 'den az olarak desenlendirilmesi ,

- Yeni maddelerin analiz işlemlerinin yapılması,
- Yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün ölçümü,
- Yüzey sertleştirmelerinde,

2.3.2. Bilimsel araştırmalardaki uygulamaları

- Yerküre üzerindeki hareketlerin hassas ölçümü,
- Malzemelerin kimyasal analizlerinde
- Çok hassas bilimsel ölçümlerde (ışık hızı ölçümü),

2.3.3. Haberleşme alanındaki uygulamaları

- Yeryüzü ile uydular arası haberleşme sistemlerinde,
- Dünya üzerindeki haberleşme ağında fiber-optik sistemlerle birlikte kullanılması,
- Yüksek yoğunlukta ses ve görüntü bilgileri depolanması (compact disc, video disc),

2.3.4. Tıp alanındaki uygulamaları

- Zarar görmüş dokuları keserek almak,
- Yaraları iyileştirmek,
- Kanamayı durdurmak,
- Göz retinasında oluşan zedelenmeleri gidermek,

2.3.5. Askeri alandaki uygulamaları

- Mega watt mertebesinde çıkış güçleri olan yüksek güçlü lazerlerin yakıcı etkisi ABD, Fransa ve İngiltere gibi bazı ülkelerce hedeflerin direkt tahriplerinde kullanılmaktadır.

- Orta Güçlü Lazerlerin mevcut uygulama alanları; mesafe bulma , hedef takibi, füze ve bomba güdümü, hedef işaretleme

Lazerin askeri uygulamalarda tercih edilme nedenleri özetlenirse:

- Açısal hassasiyet (ışınımının doğrusal şekilde olması),
- Uzun mesafelere ulaşma (lazer gücünün yüksek olması)
- Mesafe ölçümünde hassasiyet (darbe genişliğinin çok dar olması)
- Selektif tespit (spektral band aralığının çok dar olması sebebi ile)
- Kullanım kolaylığı (küçük boyutta ve hafif olmaları) [5].

2.4. Lazer güvenliği

Lazerler görünmez oldukları ve dalga boyu ile değişik yüzeylerden yansydıkları için insanlar açısından oldukça tehlikelidirler. Lazer cihazları ile çalışırken mevcut potansiyel tehlikelerden haberdar olmak gerekir. Özellikle bu ortamda çalışacak kişilerin alması gereken tedbirleri bilmesi ve uygulaması büyük önem arz etmektedir. Bu yüzden lazer güvenliği lazerle çalışanlar için çok önemlidir. Bununla birlikte genelde kullanılan lazerler insan vücudu ile temasta ilk olarak yanma hissi uyandırırılar. Bu temas da insan vücuduna herhangi bir zararı olmaz. Fakat gözler için bu temaslar tehlikelidir. Lazerler dalga boylarına ve max. çıkış güçlerine göre dört grupta sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma lazerleri insan üzerine etkileri üzerine kategorize eder. Sınıf-1' den Sınıf-4' e kadar lazerler sıralanmıştır.

a) Sınıf-1: Normal kullanımda insan üzerinde etkisi olmayan lazerlerdir.

b) Sınıf-2: Gücü 1mw'ın altında olan ve ışığı gözle görülen lazerlerdir.

c) Sınıf-3: Gücü 1 ile 500 mW arasındaki lazerlerdir. Ciltle temas ettiklerinde tehlike teşkil etmeyen, yangın tehlikesi yaratacak kadar gücü olmayan lazerlerdir. Odaklandığı zaman ve korunulmadığı zaman göze zararlıdır.

d) Sınıf-4: Gücü 500 mW ve üzerindeki lazerlerdir. Yangın tehlikesi oluşturan, cilt ve gözler için tehlike teşkil eden lazerlerdir. Yansımaları bile göze ve deriye zarar verir [8].

2.5. Lazerle ilgili beklenen gelişmeler

Nükleer enerji alanında lazerin çeşitli gelişmelere yol açacağı beklenmektedir. En önemlisi başlatılması zor olan termonükleer-füzyon olayının (hidrojen bombası ve güneşte her an meydana gelen reaksiyon) lazer ile tetiklenmesidir. Böylece dünya enerji sorunu halledilmiş olacaktır.

Lazer ışınının darbe süresinin saniyenin trilyonda birine düşürülmesi halinde kısa bir sürede üretilecek enerji bugün dünyada aynı müddette üretilmekte olan enerji toplamından fazla olacaktır. Lazer ışını ile çalışan silahların yapılması ile çok uzaklardan mühimmat, akaryakıt, karargah binaları imha edilebilecektir. Lazer özelliği dolayısıyla bilgisayarın hafıza kapasitesini büyük ölçüde arttırabilecektir [7].

3. LAZERLE MALZEME İŞLEME

3.1. Giriş

Teknolojideki büyük gelişmeler (sanayi, sağlık, askeri savunma ve uzay endüstrisi gibi tüm alanlar) farklı birçok malzemenin kullanım gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu malzemelerin işlenmesindeki sorunlar lazer sistemleri sayesinde büyük ölçüde çözülmüş ve halen devam eden çalışmalar ile işlem kalitesi günden güne artmaktadır. Lazerler yüksek yoğunluklu enerji kaynağı olarak özellikle, kesme, delme, kaynak, yüzey işleme, markalama, kaplama gibi alanlarda daha çok tercih edilmektedir. Son dönemlerde mikro boyuttaki yapıların çok fazla kullanımı ile lazerlere duyulan ihtiyaç daha da artmıştır. Yüksek işlem hızı, yüksek kalite, düşük ısıl zarar, yüksek derinlik/genişlik oranı ve temiz bir işlem ortaya çıkarmalarından dolayı lazerler diğer işlemlere göre son dönemlerde daha çok kullanılmaktadır. İlerleyen yıllarda lazerle malzeme işleme metodu daha çok kullanım alanı bulacaktır.

3.2. Lazerle malzeme işleme teknikleri

Lazer ışını uyumlu, spektral olarak saf ve yönlendirilebilir olmasından dolayı diğer ışık kaynaklarından çok farklıdır. Lazerlerin birçok parametrelerinin uygun şekilde değiştirilmesi ve uygun optik sistemlerle çok küçük alanlara odaklanabilmesiyle birçok farklı malzemenin işlenebilmesi mümkün olmuştur.

Lazer, odaklanmış bir noktaya yüksek enerji transfer ederek odaklamanın yapıldığı noktadaki malzemeyi eritmesi ve ardından hızla buharlaştırması ile malzemeleri kesebilmekte, delik açabilmekte, yüzey işleyebilmektedir [10,11,12,13].

Özellikle mikro ölçüde işlenmesi gereken elektronik, medikal ve endüstriyel parçaların imal edilmeleri sürecinde, lazer temas etmeden ve diğer konvansiyonel işleme yöntemlerinin dezavantajlarını taşımadan, yüksek hassasiyette ve sorunsuz olarak işlem yapabilmektedir [10].

Lazer ışını ile kaynak, monokromatik ışınların yüksek enerjilerinden yararlanılarak malzemelerin bir kısmının eritilmesi ve buharlaşması esasına dayanmaktadır. Lazer ışını ile kaynak aslında bir eritme kaynağı yöntemidir. Güç yoğunluğu malzeme kuvvetle buharlaşmadan eriyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ilave metal kullanılmadan çalışıldığı için, parçalar birbirlerine tam olarak birleştirilmelidir. İşlemler karakteristik olarak, metal esaslı ve metal olmayan malzemelere uygulanabilmesi dışında, ısı tesiri altında kalan bölgelerin diğerleri ile kıyaslanamayacak derecede dar olması ve ulaşılan yüksek hızları ile dikkati çekmektedirler [14].

Lazerle saçların ve levhaların düz veya çevresel olarak kesilmesi diğer yöntemlere (oksi-asetilen alevi veya plazma arkı) göre rahatlıkla yapılabilmektedir. Lazer ışını ile delik delinebilir, gravür işlenebilir, yiv açılabilir. Lazer ışını ile kesmenin üstünlüğü, klasik kesme yöntemlerine nazaran, küçük bir kesme genişliği ve dar bir ısının tesiri altında kalan bölgenin elde edilmesidir. Kesme işleminde yalnız CO₂ - lazeri kullanılmaktadır. Çelikler, kurşun, kalay, çinko ve krom kaplı, titanyum, zirkonyum, niyobyum, tantal, nikel ve bu malzemelerin alaşımları kesmeye uygundur. Buna karşılık alüminyum, pirinç, bakır, gümüş ve altın gibi yüksek yansıtımlı malzemeler, hiçbir şekilde CO₂ - lazeri ile kesilemezler. Lazer ışını ile, metal olmayan organik esaslı (akrilik, polietilen, deri, ahşap, lastik, yün, pamuk) ve inorganik esaslı (cam, kuartz, seramik, porselen, asbest, mika, alumina ve grafit) maddelerin bir çok türleri rahatlıkla kesilmektedir [10].

İlerleyen teknoloji ile birlikte ihtiyaç duyulan mikrometre veya nanometre boyutlu malzemelerin işlenmesinde lazer sistemleri tercih edilmektedir. Son incelemelere göre lazerle malzeme işleme; delme %4 , işaretleme %30, kaynak %13, mikroişlem %13, kesim %32 ve diğer %8 olarak kullanılmaktadır [15].

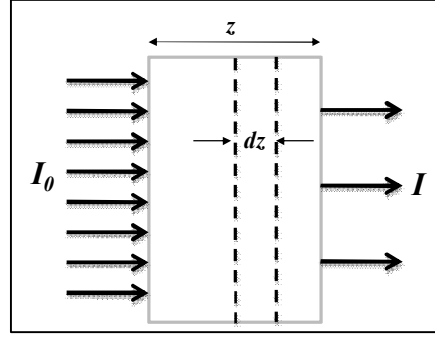
3.3. Işığın malzeme ile etkileşmesi

Malzeme üzerine belirli şiddette ışın gönderildiği zaman bu durumda soğurulma meydana geldiğinden, çıkan ışın şiddetinde azalma meydana gelecektir. Burada diğer olaylar (saçılma v.s.) dikkate alınmamıştır. Işığın soğurulması hem mekanik hem de kuantum teorisine göre açıklanabilir [16].

Klasik teori bakımından, açısal frekansı ω olan ışık dalgasının oluşturduğu elektrik alanının etkisiyle, atom veya moleküllerin elektronları çekirdeğe göre yerlerini değiştirerek frekansı dış ışık alanın frekansına eşit harmonik hareket yaparlar. Titreşim hareketi yapan elektronun hareketi ivmeli harekettir. Öte yandan ivmeli hareket yapan parçacık elektromanyetik dalga yayınlar. Bu sebepten titreşen elektronun kendisi kaynağa çevrilerek, frekansı gelen ışığın frekansına eşit olan ikinci dalgalar yayınlamaya başlar. Elektron tarafından yayınlanan ikinci dalgalar gelen ışık dalgası ile uyumlu olduğundan bu iki dalga girişim yapar. Bunun sonucunda genliği, gelen ışığın genliğinden küçük olan toplam dalga oluşur. Şiddet, genliğin karesiyle orantılı olduğundan, ortamdan geçen ışığın şiddeti onun üzerine düşen ışığın şiddetinden küçük olacaktır. Böylece ışığın soğurulması olayı ortaya çıkacaktır. Işığın belirli bir kısmı yayınlanacaktır. Soğurulan kısmı başka enerji türlerine (ısı gibi) çevrilir. Bu da soğurucu ortamın ısınmasına sebep olur [16].

Kuantum-mekanik kavramlara göre atom moleküllerin enerjisi sürekli değil, kesikli değişir. Atom ve moleküller, enerjileri en az olan temel halde veya nispeten büyük olan uyarılmış durumda bulunurlar. Işık ortamda yayılırken onun enerjisinin bir kısmı atom ve moleküllerin uyarılmasına harcanır. Diğer kısmı ise ortamdan çıkar. Neticede (şekil 3.1'de gösterildiği gibi) ortamdan çıkan ışığın şiddeti ortam üzerine gelen ışığın şiddetinden az olur. Bu azalma miktarı gelen ışık şiddeti ve soğurucu tabakanın kalınlığı ile doğru orantılı olmalıdır [16].

$$dI = -\alpha z dz \quad (3.1)$$



Şekil 3.1: Bir tabakadan ışığın soğurularak geçişi [16].

α maddeyi karakterize eden bir büyüklüktür ve çizgisel (lineer) soğurma katsayısı olarak adlandırılır. Eşitlik (3. 1), sıfırdan tabaka kalınlığı olan z 'ye kadar integre edilirse,

$$I_z = I_0 e^{-\alpha z} \quad (3.2)$$

elde edilir. I_z ; kalınlığı z olan tabakadan geçen ışık şiddetidir. Eşitlik (3. 2) Buger-Lambert kanunu olarak bilinir [16]. Eşitlik (3.2) '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 gelen ışığın şiddeti çıkan ışığın şiddetinden her zaman büyük olacaktır [17].

3.4. Lazerle delme işlemi

Bu bölümde lazerle delme yöntemi hakkında teorik bilgi verilecektir. Lazerle delmenin fiziksel temeli ve diğer yöntemlerden farkı geniş bir şekilde açıklanacaktır. Özellikle mikron mertebelerinde delik delmede lazerle delme yöntemi kullanılmaktadır. Delik delme için kullanılan lazerler kaynak için kullanılan lazerlerden biraz farklıdır. Delme ve kesme işlemlerinde kullanılan lazerlerin ışın şiddeti daha fazla ve atım süreleri daha kısa olmalıdır [18]. Delme işleminde; metalik malzemeler için soğurmasına bağlı olarak yüksek güçlü lazerler (görünür bölge ve yakın kızılaltı bölgede ışın yapan) kullanılmakta, polimer benzeri malzemeler için ise bu malzemeler ısıdan fazla etkilendiğinden dolayı UV bölgesinde ve uzak kızılaltı

bölgesinde ışına yapan lazerler kullanılmaktadır (193 nm, 248 nm, 266 nm, 355 nm dalga boyunda ışına yapan lazerler) [18,10,11,12]. Günümüz teknolojisindeki gelişmelerle birlikte daha çok; iş gücü ve zamandan tasarruf için bu yöntem tercih edilmektedir.

3.4.1. Lazerle delmenin kullanım alanları

Lazer delme işlemi, uçak sanayi, uzay sanayi ve otomotiv endüstrisi için çok önemli bir uygulamadır. Gelişen teknoloji ile geliştirilen lazer sistemleri sayesinde endüstride özellikle hassas delme işlemleri için lazerlerin kullanımı artmaktadır [19]. Seramik, silikon ve polimer katmanları lazerle delme elektronik endüstrisinde oldukça geniş kullanılır. Günümüzde lazerler ile çok kısa sürede çok fazla delik delmek ve yüzey düzgünlüğü oldukça iyi delikler elde edilebilmektedir. İnce sac levhalardan kalın seramik malzemelere kadar her türlü malzeme lazerler ile delinebilmektedir [9].

Özellikle mikroelektronik endüstrisinde; mikro-devre imalatında, manyetik hard disk yazılımında, video kafalarında ve elmas filmlerde, Havacılık ve gelişmiş otomotiv endüstrilerinde; soğutmada kullanılan gaz türbin pervanelerinde, yakıt enjeksiyonlarında, mikromekanik endüstrisinde; saat, tıp, mücevherlerde birkaç mikrondan birkaç yüz mikron çapına kadar olan delikler kullanılmaktadır.

3.4.2. Lazerle delmenin diğer yöntemlerden farkı

Lazerle delme eskiden kullanılan diğer delik delme yöntemlerine göre çok daha kolay olmaktadır. Özellikle mikron ölçüsünde delikler delmek lazerle daha basit olmaktadır. Diğer delik delme yöntemlerine göre (Elektro erozyon ile işleme (Electrical Discharge Machining - EMD) ve mekanik delme) lazerle delme yöntemiyle oldukça küçük ve hassas delikler delinebilmektedir. Bu yöntemlerle lazerle delme yöntemi karşılaştırması Tablo 3.1'de gösterilmiştir [9].

Tablo 3.1: Lazerle delik delme yönteminin karşılaştırılması [9]

	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 sivriliği, Derinlik ve çap sınırlı, Delik girişinde tekrar katılma

3.4.3. Lazerle delik oluşum süreci

Lazer ile delme işleminde delik oluşumu, malzemenin buharlaşarak tahliye edilmesiyle olur. Lazer ışını, üzerine düşürülen hedef tarafından soğurulmakta veya yansıtılmaktadır. Soğurulan ışın malzemede erime ve buharlaşmaya neden olur. Erime ve buharlaşma aynı zamanda olduğu için oldukça karışık bir işlemdir. Bu fiziksel süreçleri ve malzemenin özelliklerini göz önünde bulundurmamak lazerle malzeme işleme sınırlarını ve kapasitesini bilmek açısından önemlidir. Bu etkileşimler lazerle malzeme işlemede lazer uygulamaları için bir temeldir.

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 [10,11,12,13]. Ablasyon için temel olarak, foto-termal ve foto-kimyasal olmak üzere iki model sunulmuştur. Her ikisinde de çıkarılan malzeme gaz halinde tahliye edilir. Lazerin dalga boyu, malzemenin termal özellikleri, lazer atım genişliği, frekans ve enerji yoğunluğu gibi parametrelere bağlı olarak yöntem seçimi yapılır. Kısa dalgaboylu fotonlar daha yüksek enerjili olduğundan foto-kimyasal reaksiyonu başlatırlar [12].

Uygulamada en önemli parametre malzemede termal 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. Bu bağlar ve bağların kırılması için gerekli olan foton enerjileri Tablo 3.2’ de verilmiştir.

Tablo 3.2: Polimer zincirinin bağlarını kırmak için gerekli foton enerjisi ve dalga boyu [10].

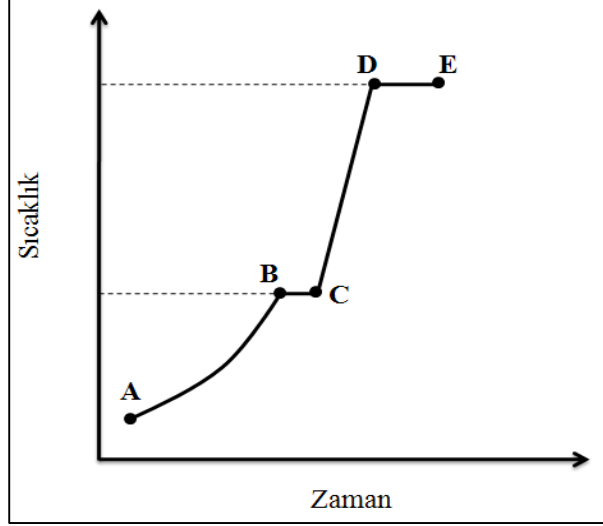
Bağlar	Ortalama Bağ Enerjileri	Eşik Foton Enerjileri	Kritik Dalga Boyları
C-C Bağları	347 kJ/mol	3.6014 eV	344 nm
C-H Bağları	414 kJ/mol	4.2967 eV	288 nm

Foto-termal 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 aşıldınca bağlar kırılmaya başlar [10,11].

Lazer enerjisinin malzemeye gönderilmesi esnasında çok kısa sürede gerçekleşen ısısal süreçler Şekil 3.2’de olduğu gibidir. Malzemede lazer enerjisi gönderilen nokta önce ısınır, ısınan nokta erir ve daha sonra buharlaşır.

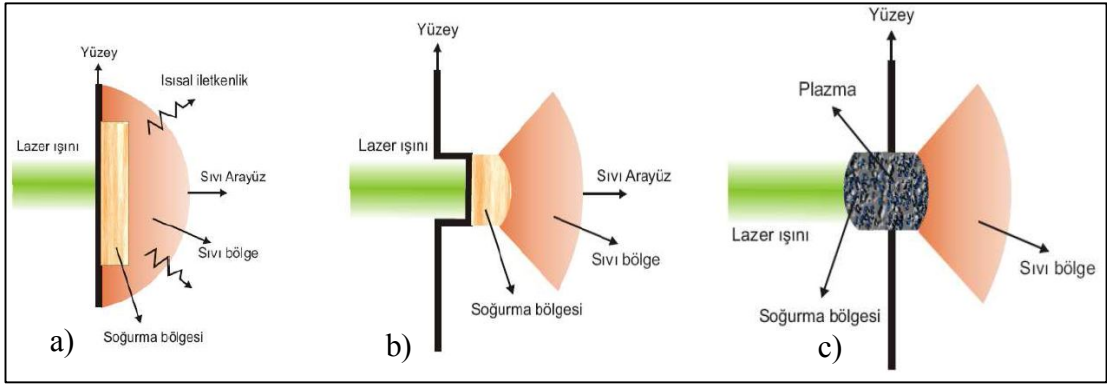
Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi, lazerin malzemenin üzerine düşürüldüğü bölge için, A noktasında iken bu bölge katı durumdadır. Zamanla gelen ışın bu bölgeyi ısıtır. Bu ısınma B noktasına kadar devam eder. B noktasında malzeme henüz eriyik haline gelmemiştir. Bu esnada bölge ısınmaya devam edecektir. 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 süre 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 işlemler çok kısa sürede gerçekleşecektir [17].



Şekil 3.2: Sıcaklık – Zaman değişim noktaları [20]

Malzeme üzerine düşürülen lazer ışınının enerjisi ilk aşamada yüzeyde depolanır. Depolanan bu ısı enerjisi ısıl iletkenlik sayesinde malzeme içine nüfus eder. Şekil 3.3a' da görüldüğü gibi yüzey erime sıcaklığına ulaşıldığında malzeme üzerinde sıvı bir ara yüzey oluşur ve ısı malzeme içine doğru ilerlemeye başlar. Işıma devam ettiğinde Şekil 3.3b' de görüldüğü 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) [17].



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

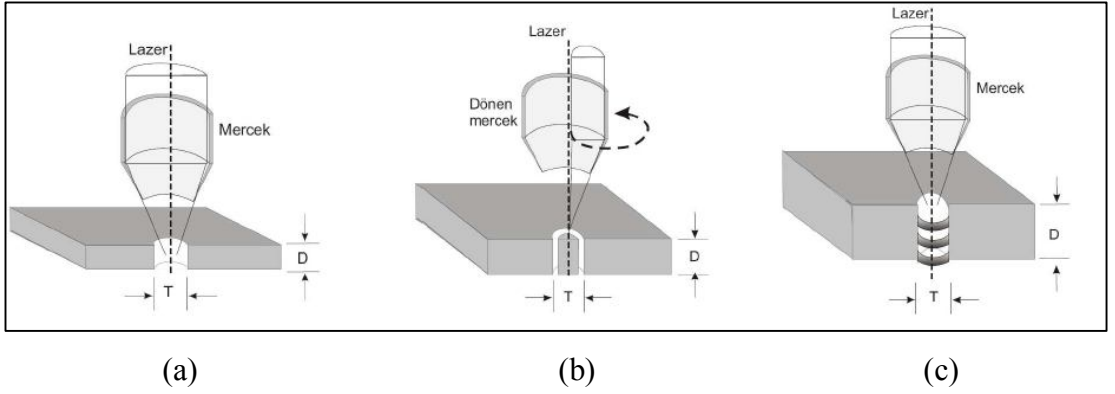
Hedef malzemede delik oluşmaya başlarken oluşan basınca sebep olan buhar, kraterin çıkış ağzına doğru bir akış sağlar. Bu akış krater sınırları boyunca eriyik halinde taşınabilir. Bu akış işlemi buharlaştırılmamış malzeme damlacıkları şeklinde kütlenin bir kısmı taşınır ve sonuçta eğer buharlaşmış malzemenin hepsi taşınırsa büyük bir kütle delikten taşınmış olur . Bu taşınma ile beraber delik oluşturulmuş olur [17].

3.4.3.1. Lazerle delik delme teknikleri

Lazerle delme işleminde atım sürelerine göre kullanılacak birkaç farklı teknik vardır. Lazerle delme işleminde kullanılan teknikler istenilen deliğin şekline göre değişmektedir. Bu teknikler:

- Çok atımlı delme,
- Tek atımlı delme,
- Keserek delme olarak isimlendirilir.

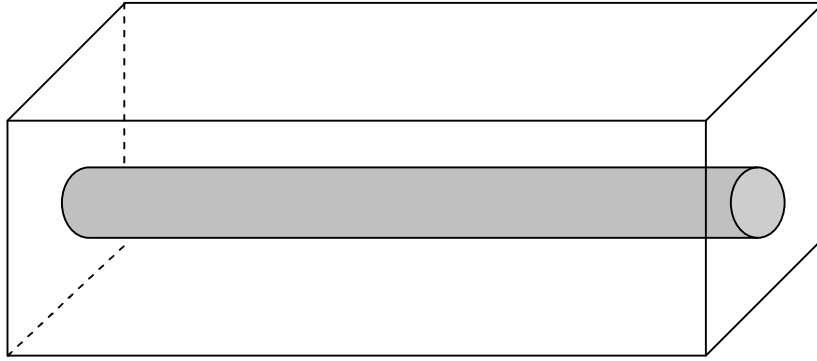
Çok atımlı delme tekniği, çok sayıda kısa süreli atımı hedef malzeme üzerine göndererek çapı 1 mm 'den küçük ve yaklaşık 20 mm derinliğinde delikler elde etmek için kullanılır. Tek atımlı delme tekniği, tek lazer atımını hedef malzeme üzerine gönderilerek çapı 1 mm 'den küçük ve derinliği yaklaşık 3 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, 21]. Şekil 3.4' de bu teknikler sırası ile gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Lazerle delme teknikleri: a) Tek atımlı, b) Keserek, c) Çok atımlı [17].

3.4.3.2. İdeal delik ve delik modellemesi

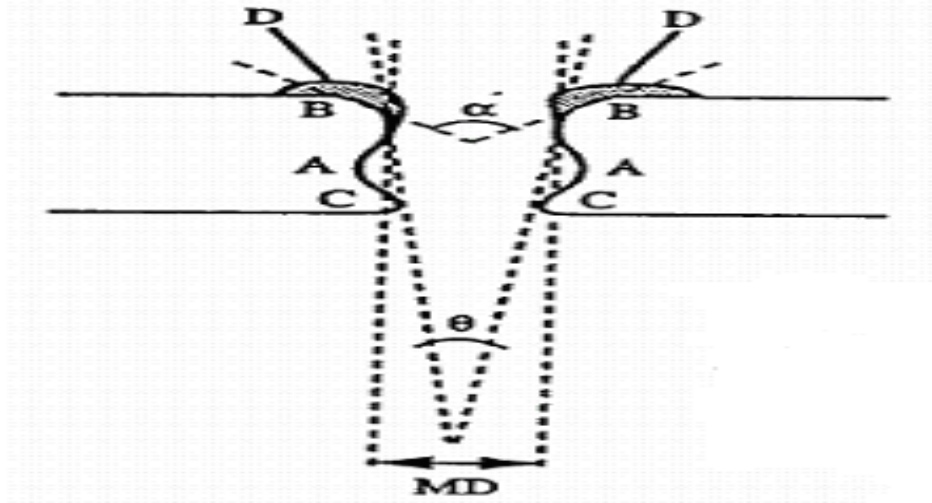
İdeal delik; yüksek derinlik/genişlik oranı, deliğin giriş ve çıkış çaplarının eşit olması, delik şeklinin silindirik olması, delik yüzeyinin pürüzsüz olması, deliğin giriş ve çıkışının etrafında çapaklanmanın ve ısıdan etkilenmiş bölgenin (HAZ-Heat Affected Zone) çok küçük olmasıyla sağlanır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5: İdeal bir delik şekli.

Lazerle malzeme işlemede yüksek delik yüzeyinin pürüzsüz olması istendiği için termal etki istenmeyen bir durumdur. Delik civarında yanma olduğu zaman, hem oluşan pürüzlülüğten hem de deliğin giriş ve çıkış çaplarının eşit olmamasından dolayı istenilen delik kalitesine ulaşılamamaktadır.

Basit bir delikte olması gereken parametreler Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Bu parametrelerin bilinmesi kaliteli delik oluşturmak için önemlidir.



Şekil 3.6 : Lazerle oluşturulmuş basit bir delik şeması [18].

Şekil 3.6’da gösterilen parametreler :

A: Fıçı şekli.

B: Tekrar katılaştıran malzeme.

C: Çıkış konisi.

D: Yüzeydeki yıkıntı.

α : İç koni.

θ : Dar koni.

MD: Ortalama delik çapı.

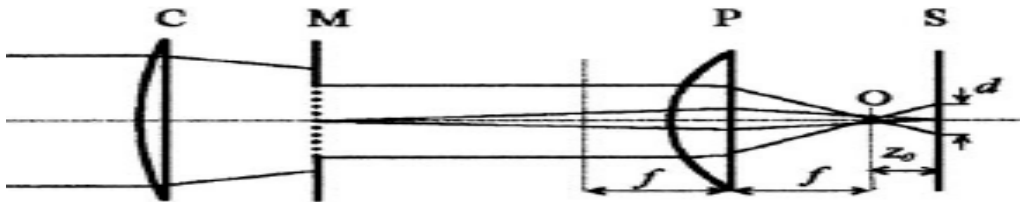
Pratik olarak, delik delme işleminde delik derinliğine etki eden birkaç etken vardır. Bu etkenler yüzeyden yansıtılan enerji kaybı, plazmadan soğurulan enerji kaybı, ısıl iletkenlik kaybıdır. Bu etkenler delik boyutunun malzeme içine doğru ilerlemesini azaltır. Eriyik malzeme boşaltılırken artan delik 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. Bununla birlikte tamamı dışarı atılamaz ve bir kısmı yüzeyde yıkıntı olarak kalır [17].

Kaliteli bir delik oluşturmak için sürekli değil de, atımlı lazer kullanmak gereklidir. Atımlı delme işlemi, atımların belirli bir düzende hedefin aynı noktasına odaklama işlemi olup, odaklandığımız bölgeden eriyik çıkarmayla sonuçlanan delme işlemidir.

Bu işlemde, lazerle madde etkileşimi doğrusal olmadığından, niteliğine göre, eriyik çıkarma oranı değişkenlik çeşitliliğine bağlı olarak değişimler gösterir. Bu değişkenler, deliğin şeklini, lazer çıkışındaki düzensiz değişimi, plazma bulutundaki azalma ve saçılım ile demetin soğurulmasını içerir.

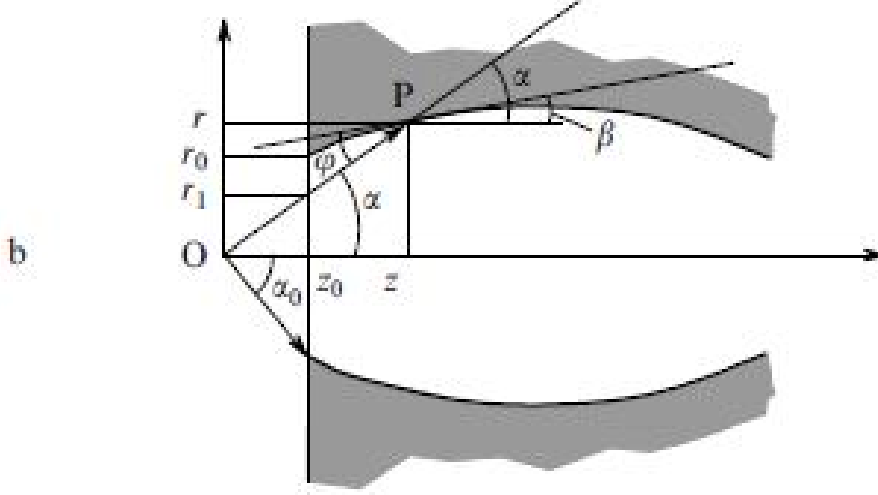
Lazer ile delme işleminde; atım süresi demetin malzeme ile etkileşmesinde deliğin kalitesi ve derinlik oranı bakımından çok önemli rol oynamaktadır. Örnek olarak metallerde, lazer enerjisi başlangıçta elektronlar tarafından soğurulur. Elektronların ısınması yaklaşık 100 femtosaniye civarındadır. Elektronlar ve fotonlar arasındaki ısıl denge, elektron ve fotonlar arasındaki etkileşme zamanından (0,5-50 pikosaniye) çok sonra gerçekleşir. Buradan anlaşılacağı gibi atım süresi elektron foton etkileşme zamanından kısa olan bir lazer ile işlem yapıldığında, ısı örgülere aktarılmaz, bu nedenle malzemede erime veya ısıl 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 ısıl işlem hala nanosaniye mertebelerindedir. Bundan dolayı erimiş katmanlar asla tamamıyla yok edilemez, ancak çok ince malzemelerin işlenmesinde (mikron mertebelerinde) en aza indirilebilir [22].

İyi bir delik için kullanılan lazerin yüksek şiddetli olması gereklidir. Şekil 3.7’de ışın odaklama mekanizması gösterilmiştir. Burada C: Toplayıcı mercek, M: Maske, P: Yönlendirici mercek, ve S: Malzeme yüzeyidir.



Şekil 3.7: Yüksek şiddetli ışının elde edilmesi için optik düzenek [10].

Lazerle delme uygulamasında elde edilen gerçeğe yakın bir delik profili Şekil 3.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Burada **O** noktasal ışık kaynağıdır ve ışın Gaussian olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.8: Delik profili [10].

Soğurulan enerji yoğunluğu (birim yüzeye düşen enerji) ise [10]:

$$F_a(r, z) = \text{sabit} = F_t = \frac{C\rho(T_m - T_i)}{\gamma} \quad (3.7)$$

Burada;

$F_a(r, z)$: Enerji yoğunluğu (J/cm^2)

T_m : Erime noktası,

T_i : Ortam sıcaklığı,

C : Isı kapasitesi,

ρ : yoğunluk,

γ : soğurma katsayısı,

F_t : Ablasyon eşiği.

Polimerlerin ablasyon eşiği (F_t) metal ve seramiklere göre çok düşüktür. Bunun için gelen ışının enerji yoğunluğu $7 J/cm^2$ civarında olması yeterlidir. Plazmanın yan duvarlara etkisi de minimum olacaktır. Bu etki hesaplamalarda ihmal edilecektir. Metal ve seramiklerde bu etki ihmal edilemez [10].

Şekil 3.8'deki (r,z) koordinatlarındaki P noktasında soğurulan enerji yoğunluğu [10]:

$$F_{\alpha}(r, z) = A_{eff}(\varphi(r, z)) \times F(r, z) \sin \varphi(r, z) \quad (3.2)$$

Burada :

A_{eff} : Yüzeyin soğurganlığı; açığa bağlıdır.

$F(r, z)$: Gelen enerji yoğunluğu; nokta kaynak ile yüzey arasındaki uzaklığa, ışının açısal ıraksanımına ve ışın özelliklerine bağlıdır.

$\varphi(r, z)$: Teğet açısı

Buradaki kritik açılar (eşitlik 3.3 ve 3.4) hesaplanacak olursa, delik kenarının P(r,z) noktasındaki bölgesel eğimi (eşitlik 3.5) bulunmuş olur [10].

$$\varphi(r, z) = \alpha(r, z) - \beta(r, z) \quad (3.3)$$

$$\alpha(r, z) = \arctg(r/z) \cong r/z \quad (3.4)$$

$$\beta = \arctg(dr/dz) \cong dr/dz = d(\alpha z)/dz = \alpha + z(d\alpha/dz) \quad (3.5)$$

Eşitlik 3.3'de açılarının değerleri ($\varphi, \alpha, \beta < 1$) birden küçük olduğu kabul edilecektir [10].

$$A_{eff}(\varphi(r, z)) \cong 1 \quad (3.6)$$

Burada A_{eff} (yüzeyin soğurganlığı) polimerlerdeki değeri yaklaşık olarak 1 kabul edilir [10].

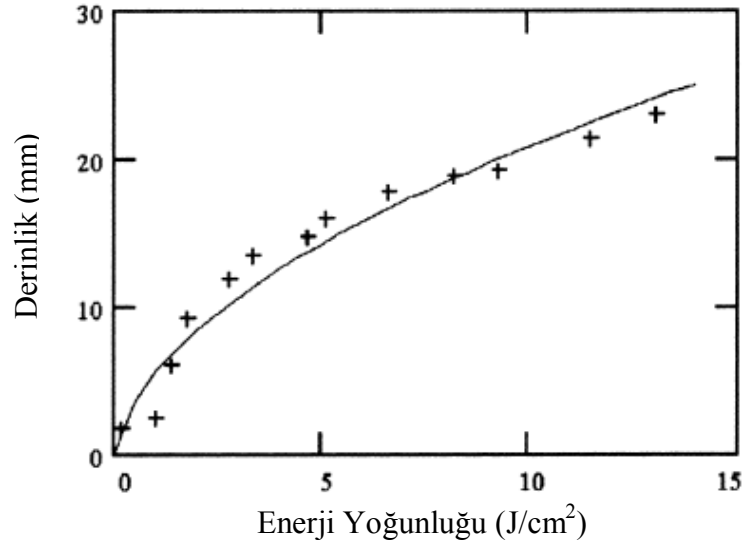
Şekil 3.5'de gösterilen delik duvarındaki herhangi bir P noktasının konumu eşitlik 3.7 ile bulunur [10].

$$r(\alpha) = \alpha z(\alpha), z(\alpha) = z_0 \left[1 + \frac{2}{F_t} \int_{\alpha}^{\alpha_{\infty}} (\alpha') d\alpha' \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

Bu eşitlikte yapılan birkaç işlem sonucu delik derinliğinin gelen enerji yoğunluğu ile değişimi, eşitlik 3.8 ile bulunur. Bu eşitlik ile enerji yoğunluğuna bağlı delik derinliğinin hesaplanması yapılır [10].

$$h(F) = z_0 \left[\left(1 + \frac{2F\gamma r_0}{C\rho(T_M - T_i)z_0} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (3.8)$$

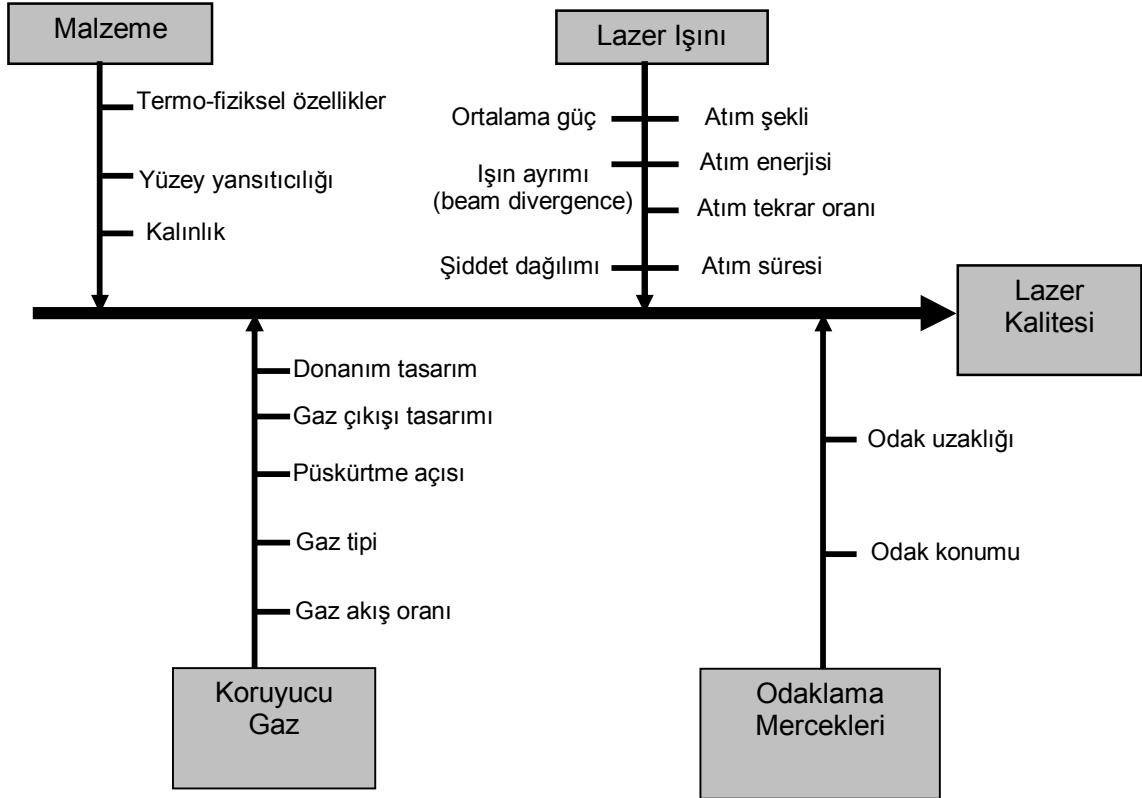
Delik derinliği ile gelen enerji yoğunluğu arasındaki grafiksel değişim Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9: Enerji yoğunluğu ile derinlik arasındaki değişim [10].

3.4.4. Lazerle delmeyi etkileyen parametreler

Lazerle malzeme delme işleminde temel sorun en uygun parametrelerin seçilmesidir. Lazerle delme işlemi için demet kalitesi, dalga boyu, atım enerjisi ve frekans önemli değişkenlerdir. İyi bir delme işlemi için lazerle delme kalitesini etkileyen parametrelerin kontrol edilmesi gereklidir. Bu parametreler Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10: Lazerle delme kalitesini etkileyen parametreler [18].

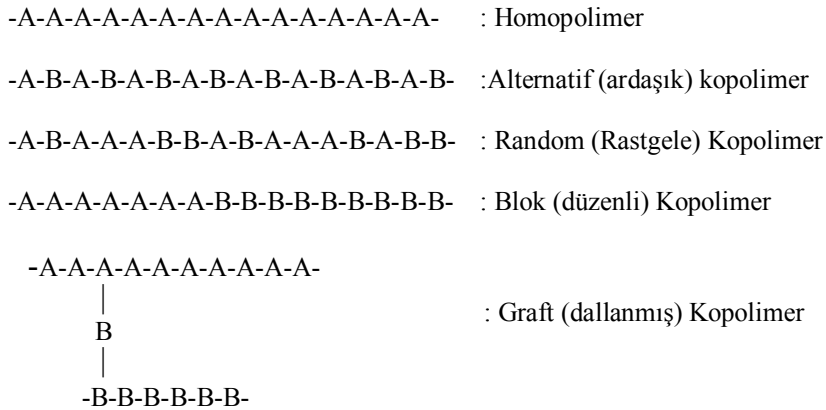
Şekil 3.10’da görüldüğü gibi 4 ana başlıkta, toplam 17 parametre lazerle delme kalitesini etkilemektedir. Bunun için en uygun kombinasyonun elde edilmesi gereklidir. Lazerle delmeyi etkileyen en önemli üç parametre dalgaboyu, atım enerjisi ve frekans’dır.

4. POLİMERLER VE PVC

4.1. Polimerler

Polimer kelimesi latince poly ve meros (poly: çok sayıda, meros: parça) sözcüklerinden meydana gelmiştir. Polimerler hafif, korozyon dayanımı yüksek ve elektiriksel olarak yalıtkan malzemelerdir. Polimerler; çok sayıda molekülün kimyasal bağlarla düzenli bir şekilde bağlanarak oluşturdukları yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. Polimerlerde tekrar eden yapılara monomer denir. Tek tür monomerden oluşan polimer zinciri homopolimer, iki yada daha fazla monomer içeren polimerler ise kopolimer olarak adlandırılırlar. En basit polimer türü, aynı cins monomerden oluşan homopolimerlerdir. Bir homopolimer doğrusal olabileceği gibi, dallanabilir veya üç boyutlu ağ yapısı da gösterebilir [23].

Kopolimerler ise genellikle farklı monomerlerin düzensiz birleşmesinden oluşarak rastgele (random) kopolimeri oluştururlar. Bununla beraber, alternatif (ardışık), blok (düzenli), graft (dallanmış) ve stereoblok kopolimerler bu kuralın dışındadır. Alternatif kopolimerde monomer birimleri birbiri ardına gelir. Blok kopolimer farklı homopolimerlerin uzun segmentlerini içerir. Dallanmış kopolimer ise asıl mevcut bir polimer zinciri üzerinde bir dallanma olarak ikinci bir monomer içerir .



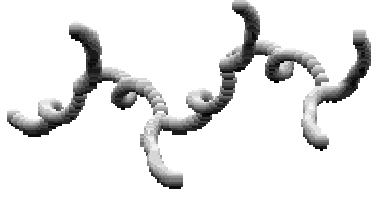
Şekil 4.1: İki monomerden meydana gelen kopolimerin değişik düzenlemeleri [23].

Ayrıca polimerler doğrusal (lineer), dallanmış ve ağ olarak da tanımlanırlar. Doğrusal polimerde hiçbir dallanma yoktur (Şekil 4.2a). Graft kopolimerler dallanmış polimerlerin bir örneğidir (Şekil 4.2b). Ağ (Network) polimerler, difonksiyonlu monomerler yerine, polifonksiyonlu monomerler kullanıldığında meydana gelirler. Ağ polimerler ayrıca çapraz bağlı polimerleri de kapsarlar (Şekil 4.2c). Çünkü çapraz bağlanmayla polimer zincirleri hareketliliklerini kaybederler. Bu nedenle erimeyecekleri ya da akmayacakları için kalıpla da şekillendirilemezler [23].



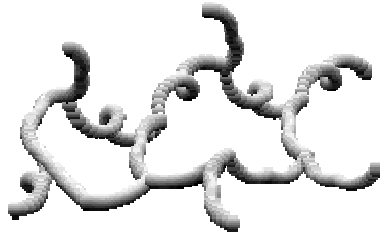
(a)

Doğrusal (Lineer) Polimer



(b)

Dallanmış (Branched) Polimer



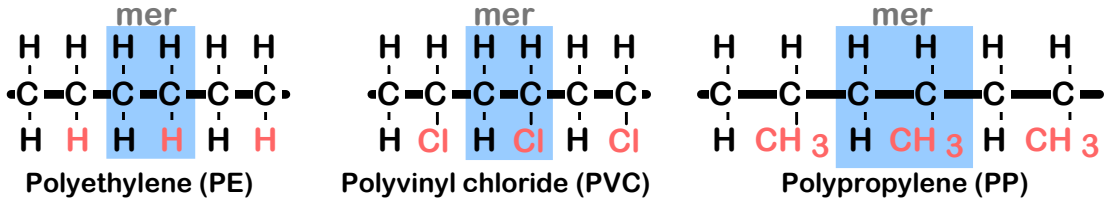
(c)

Ağ (Network) Polimer

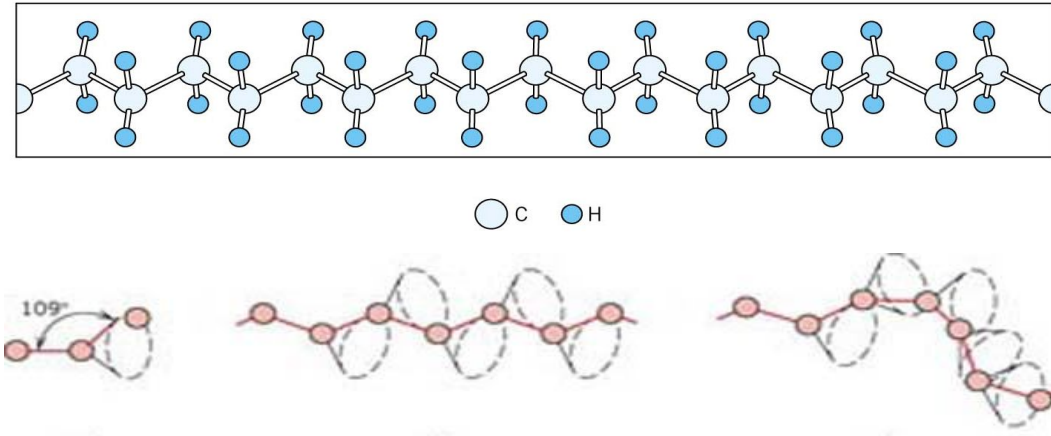
Şekil 4.2: Polimer moleküllerinde ortaya çıkabilecek dallanma tipleri [23].

Polimerlerin bu bağlanım türleri, fiziksel özelliklerini etkileyen önemli faktörlerdir. Örneğin, doğrusal polimerler sıcaklık ve basınç altında yumuşadığı halde; çapraz bağlı ve üç boyutlu şebeke yapısına sahip polimerler iyi ısı dayanımı gösterirler [23].

En basit polimer zinciri polietilen zinciridir. C ve H atomlarının kovalent bağlanması ile oluşur (Şekil 4.3). Kovalent bağlar arasındaki açı 109,5 derecedir (Şekil 4.4). Bu nedenle polimer zinciri zig zaglı yapıdadır.

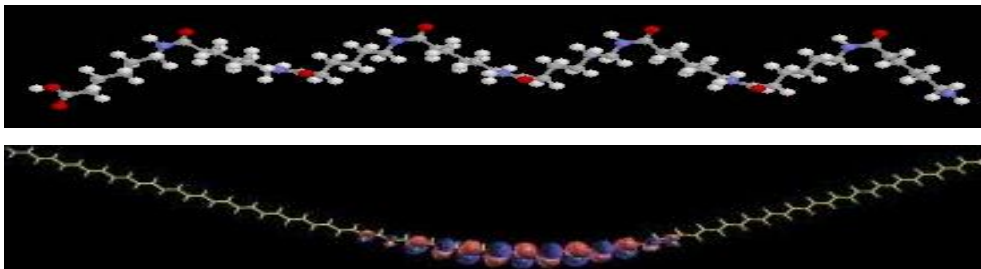


Şekil 4.3 : Polimer polietilen zincir kovalent bağları [23].



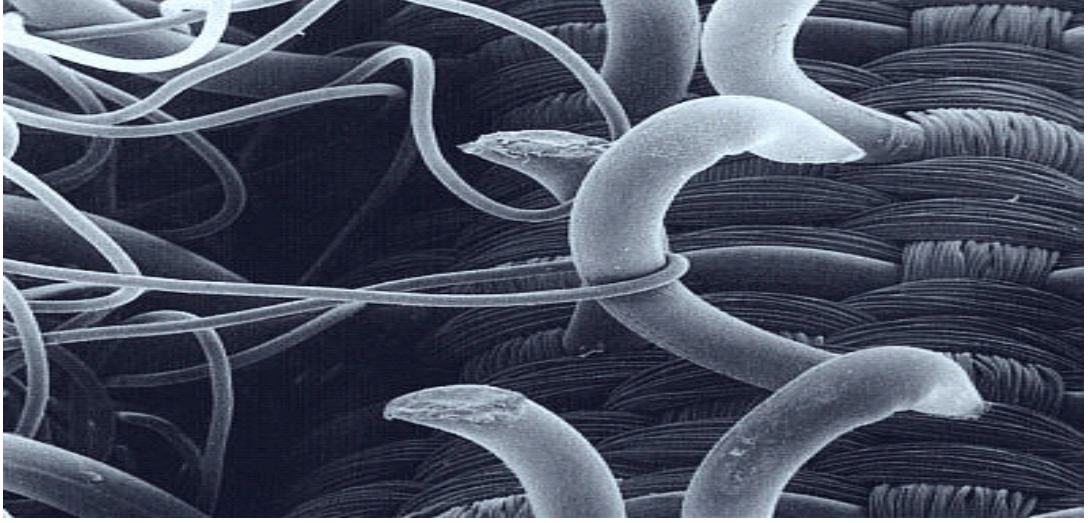
Şekil 4.4: Polimer polietilen zincirleri [23].

Monomerinde daha fazla atom içeren ve daha karmaşık polimer zincirleri de vardır. Örnek olarak Şekil 4.5'deki Naylon6 polimer zinciri gibi.



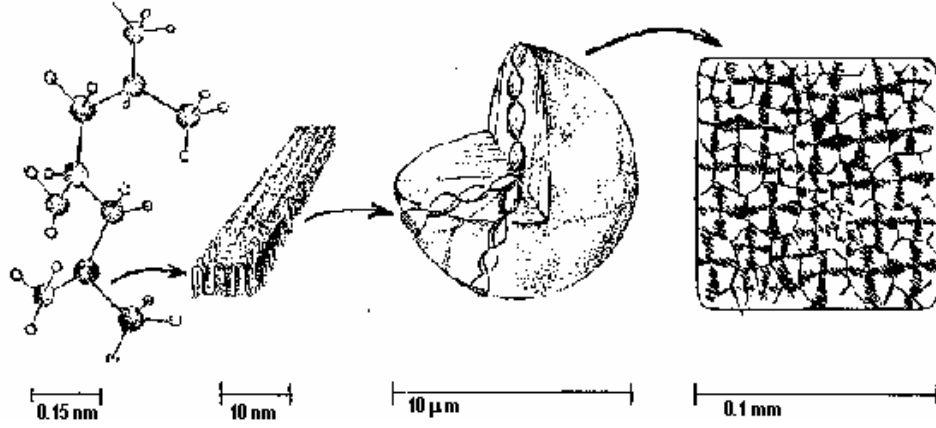
Şekil 4.5: Naylon6 polimer zincirleri [23].

Polimer zincirlerinden binlercesi yan yana gelerek günlük hayatta kullandığımız polimerleri oluşturur. Polimer zincirleri karmaşık bir tabak spagetti gibi görünür (Şekil 4.6).



Şekil 4.6: Polimer zincirleri [23].

Bir polimer zincirinin eni 0.15 nm ve polimer zincirlerinin yan yana gelerek oluşturduğu lamel yapı 10 nm mertebesinde (Şekil 4.7). Lamellerin küre merkezinden dağılımla oluşturdukları yapı 10 mikrometre ve bu yapılar yan yana gelerek 0.1 mm'lik bir polimer madde oluştururlar.



Şekil 4.7: Yarı- kristalin bir polimerin yapısı [23].

Polimer zincirlerinin binlercesinin yan yana gelerek oluşturduğu yapıya yeterince yakından bakıldığında birbirine dolanmış ve karmakarışık bir ip yumağı gibi görünür.

Doğada bulunan polimerlere, yün, pamuk, saç, bamyaya sıvısı, örümcek ağı, kauçuk... vb. pek çok yapıyı örnek verebiliriz.

4. 2. Polimerlerin özellikleri

4.2.1. Polimerlerin optik özellikleri

Günümüzde pek çok polimere renklendirici katılarak opak (saydam olmayan) hale getirilerek dolgu maddesi olarak kullanılmaktadır. Polimerlerin optik özellikleri karmaşıktır. Polimerlerinin çoğunun optik iletim berraklıkları, gerçekte renksiz oluşları, düşük yoğunlukları ve mükemmel mekanik özellikleri olması nedeniyle polimerler pek çok durumda camın yerine geçebilir. Bazı durumlarda camın kolay kırılabilir bir yapıya sahip olması nedeniyle cam kullanılması sakıncalıdır. Örnek olarak uçak camlarını verebiliriz. Böyle durumlar için en uygun malzeme saydam polimerlerdir. En çok kullanılan polimerlerden biri olan polietilen gibi polimerler ise yarı-saydam polimerlerdir.

4.2.2. Polimerlerde renksizlik ve şeffaflık

Bir polimerde ortaya çıkan şeffaflığın ve renksizliğin nedeni polimer malzemenin üzerine düşen görünür elektromanyetik radyasyonu absorbe edememesi veya dağıtamamasıdır. Yani gelen ışığı geçirirler. Bunun nedeni polimerin sahip olduğu molekülün atomlarının, tek başına olması veya ikili olması yada benzen halkasında bulunmasıdır. Bu tür atomlar elektromanyetik radyasyonun kızıl ötesi bölgesinin absorpsiyonunu yükseltir. Ultraviyole bölgesindeki elektronik transfer boyunca, fotonların enerjisi görünür ışığın enerjisinden daha büyüktür.

Polimerlerin saydam ve renksiz görünmesinin nedeni görünür ışığın dalga boylarını değiştirmeden geçirmeleridir. Işık hissedilir derecede yansıtıldığında ise renksiz ve yarısaydam (süt gibi) olurlar. Eğer polimer zinciri belli aralıklarla çift bağ içeriyorsa bu polimer görünür ışığın bir kısmını veya hepsini absorbe eder [24].

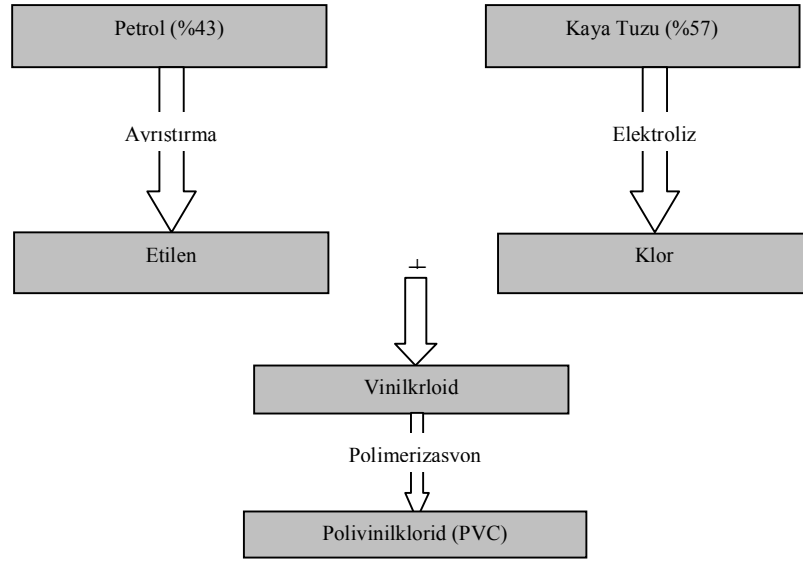
Polimerin yapısı gelen ışığın dalga boyu ile orantılı ise bu polimerlerin üzerine düşen ışıkta önemli ölçüde yansıma (dağıtma) veya yönelme meydana gelir ve bu durumun nedeni polimerin yapısının hissedilir derecede kristalleşmesidir. Polimerde kristalleşen bölgeler ışığın yansıması veya yönelmesini sağlar bu tür polimerlerde şeffaflık azalır ve yarı- saydamlık artar. Işığın yönelmemesi polimerin kristalin yapı barındırmadığının kanıtıdır [24].

Ticari olarak kullanılan polimerler genellikle ataktiktir. Monomerlerinde barındırdıkları büyük gruplar (-C=OCOCH₃) düzgün bir zincir üzerinde bulunamazlar (dengelenmesi gereken itme ve çekme kuvvetleri yüzünden). Bu tür polimerler basıncın çok yüksek olduğu yerlerde kullanılabilir.

4.3. PVC (Poly Vinyl Chloride)

Amorf bir termoplastik olan PVC (Poly-Vinyl-Chloride), saf halinde renksiz olmasına karşın, değişik katkılarla farklı renklerde temin edilebilir. Mekanik mukavemeti yüksek sert bir polimerdir. Birçok kimyasal ajana karşın güçlü olmasına rağmen özellikle çözücüler karşında zayıftır. Ultraviyole ışığa karşı güçlüdür. Çalışma sıcaklığı dar bir bölgededir (5°C'un altında kırılğan, 50°C'un üzerinde sürekli kullanılamaz) [25].

PVC diğer plastik alaşımlı maddelerle karşılaştırıldığında, çok az miktarda petrol refraksiyonu sonucu üretilir (Şekil 4.8). Klor, kaya tuzunun elektrolizi sayesinde, "atık ürün" kategorisinde ortaya çıkarak, Etilen ile bağlanır ve böylece yararlı bir şekilde kullanılır ve atmosfere serbest bırakılmaz. Etilenden, petrol ve klorun crackgas (parçalayıcı gaz) ile sodyum klorid elektrolitinden Vinilklorid PVC' nin çıkış ürünü olarak ortaya çıkartılır. Bir çok vinilklorid molekülleriyle birlikte, monomer olarak ta polimerizasyon sonucunda PVC ortaya çıkar [25].



Şekil.4.8: PVC oluşumu [25].

4.3.1. PVC'nin genel özellikleri

1. Aşınmaya ve kimyasallara karşı dayanıklıdır.
2. Yanmaz.
3. Antistatiktir.
4. Işıktan etkilenmez ve solmaz.
5. Hafiftir.
6. Isı, elektrik ve ses yalıtkanlığı sağlar.
7. Sıvı ve gaz geçirimsiz bir yapıya sahiptir.
8. Geri dönüşümlüdür ve çevre dostudur.
9. Uzun ömürlüdür.
10. Kolay temizlenir, hijyeniktir.
11. Uzun süre bakım gerektirmez.
12. Uygulaması kolaydır.

PVC'nin bu genel özellikleri yanında kimyasal ve fiziksel bir çok özelliği Tablo 4.1'de daha detaylı olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.1: PVC'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri [26].

Asitler (konsantre)	Orta-zayıf
Asitler (seyreltik)	Güçlü-Orta
Alkoller	Güçlü
Alkaliler	Güçlü
Aromatik hidrokarbonlar	Zayıf
Gres ve yağlar	Güçlü
Halojenize Hidrokarbonlar	Zayıf
Halojenler	Zayıf
Ketonlar	Zayıf
Dielektrik sabit (1MHz'de)	2.7-3,1
Dielektrik mukavemet (kV mm-1)	14
Kayıp faktörü (1MHz'de)	0.025
Hacim direnci (Ohmcm)	10^{16}
Kopma uzaması(%)	60
Sertlik (Rockwell)	R106-120
Gerilme modülü (GPa)	2.5-4
Gerilme mukavemeti (MPa)	25-70
Yoğunluk (g.cm ⁻³)	1.4
Radyasyon direnci	Zayıf
Kırılma indisi	1.54
Ultraviyole ışığa direnç	İyi
Su absorpsiyonu – (24 saatin üzerinde) (%)	0.03-0,4
Termal genleşme katsayısı (x10-6 K-1)	70-100
Isı yansıtma sıcaklığı (0.45MPa'da) (°C)	70
Isı yansıtma sıcaklığı 1.8MPa'da) (°C)	67
Özgül ısı (J K-1 kg-1)	1000 - 1500
Termal iletkenlik(W m-1 K-1)	0.12-0.25 (23°C'da)

4.3.2. PVC'nin kullanım alanları

PVC'nin en çok kullanıldığı sektör yapıdır. Pencere çerçevesi, atık su boruları, tesisat boruları, bidon ve şişe imalatında kullanılır. Çapraz bağlı ve plastikleştirici katılmış PVC, kablo yalıtımında kullanılır. Ticari olarak, Corvic, Evipol, Geon, Hostalit, Lacovyl ve Lucorex olarak ta bilinir [25].

PVC'nin sanayide kullanım alanlarının fazla olmasının nedeni uygun ve gerekli katkıların yardımıyla oluşturulan uzun ömürlü, hava şartlarına karşı dayanıklı ve sağlam bir plastik alaşımdır. Kullanım süresi 25 ile 50 yıl arasında değişmektedir. Uygun katkıların seçimiyle PVC 180-200 °C'lerde ayrıştırılmadan işlenebilir. Bu plastik alaşımının "şekil değişimleri" alçak ısı derecelerinde mümkündür. Dünya çapında yılda yaklaşık 23 Milyon ton /yıl Avrupa da ise yaklaşık 5,5 milyon ton/yıl tüketilmektedir [25].

PVC'nin önemli avantajlarından birisi ise geri dönüşümlü olmasıdır. PVC malzemeler kullanım sürelerinden 25 ila 30 yıl sonra dahi problemsiz olarak geri dönüştürülebilir yani başka bir anlatımla bir döngü içine alınabilirler. Bu nedenle PVC'ler yakılmak veya atık olarak depolanmak zorunda değildir. Yani ne toprağı ne de havayı kirletirler.

5. NANOSANİYE LAZER İLE PVC ÜZERİNDE MİKRO ÖLÇEKLİ DELİK ELDE EDİLMESİ

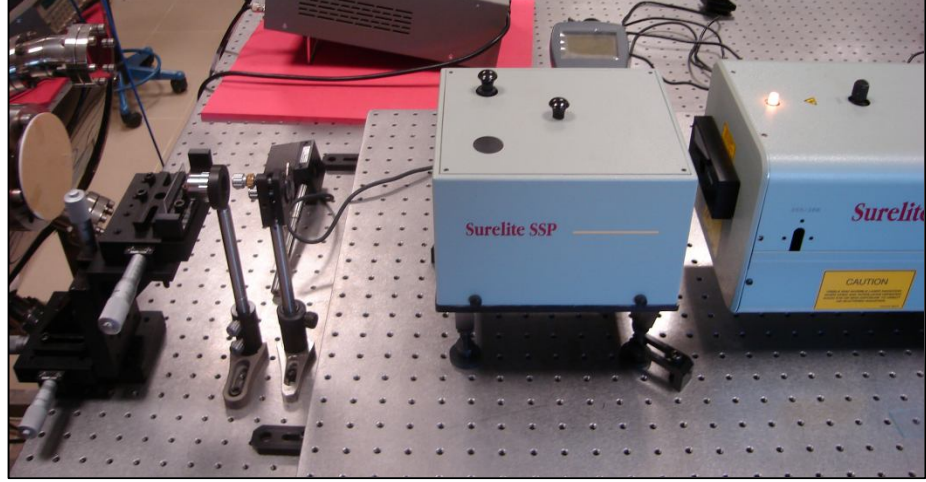
4.5 mm kalınlığındaki ve 5 mm×85 mm boyutlarında kesilmiş ve yüzeyleri temiz olacak şekilde PVC örnekler deneye alınmışlardır. Deneylerde kullanılan SURELITE CONTINUUM lazer ile farklı parametrelerde malzeme üzerinde delikler açılmıştır. Deneyde kullanılan Nd:YAG lazerinin teknik özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi (LATARUM)’nde bulunan ve deneysel çalışmada kullanılan 3 Harmoniğe sahip 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

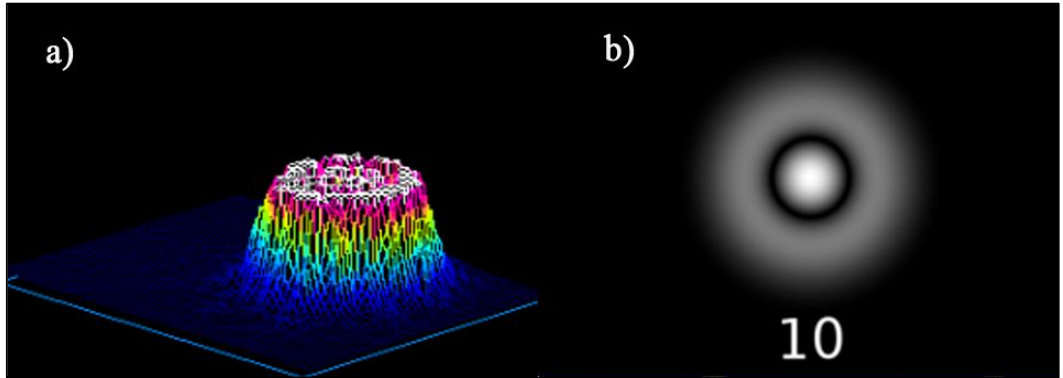
Çalışmada kullanılan lazerin 3 harmoniği bulunmaktadır. 1. harmonik 1064 nm dalga boyuna ışın yaparak, 1,41 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 1 J’ dur. 2. harmonik 532 nm dalga boyunda ışın yaparak, 1,42 kV’ luk gerilimde atım enerjisi 450 mJ’ dur. 3. harmonikte ise 355 nm dalga boyunda ışın yaparak, 1,44 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 5.1’de deneylerin yapıldığı ortamın görünümü verilmiştir.



Şekil 5.1: Atmosfer basınçlı ortam görünümü

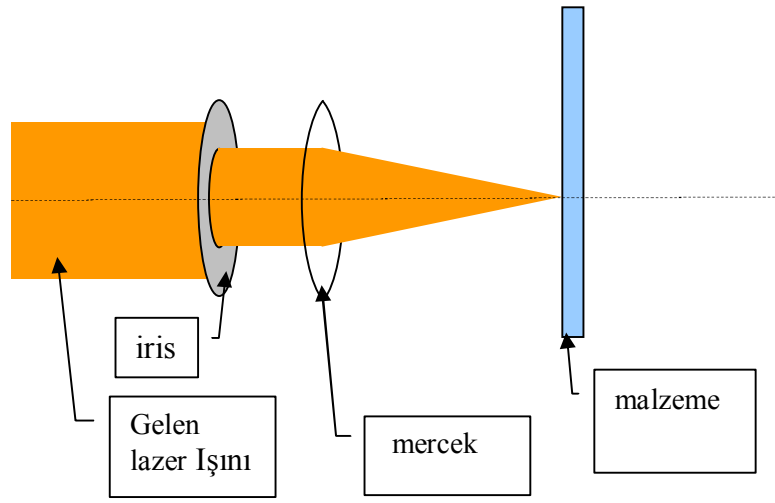
Lazer demetinin boyuna modu, demet şekil belirleyici (LPB serisi NEWPORT) kullanılarak TEM_{10} olarak belirlendi. Lazer demetinin TEM modu Şekil 5.2’deki gibidir.



Şekil 5.2: Lazer mod görüntüsü: a) Lazer demetinin TEM_{10} modunun demet şekil belirleyici ile elde edilen görüntüsü b) Bir TEM_{10} modu görüntüsü

Delme işleminde kullanılacak lazerin 1064 nm dalgaboylu temel harmoniğinin enerjisi, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde (532 nm ve 355 nm dalgaboylarında) elde

edilen enerji seviyelerine kadar inemediğinden, yüksek enerjili ışının enerjisi, bir iris yardımıyla azaltılmıştır. Şekil 5.3’de odaklama sistemi gösterilmektedir. Odaklama sistemini gösteren Şekil 5.3’de sol taraftan gelen lazer ışını, hem gelen ışının çapını hem de gelen ışının enerjisini azaltmak için iristen geçirilmiştir. Çapı ve enerjisi azalan ışın ince kenarlı bir mercekle malzeme üzerine odaklanmıştır. Gelen ışının çapı odak uzunluklarıyla orantılı olacak şekilde azaltılmıştır. 532 ve 355 nm harmonikleri için enerji lazer uyarma ile ayarlanmıştır. 1064 nm dalgaboyu için ise hem uyarma enerjisi hem de iris ile enerji ayarlanmıştır.

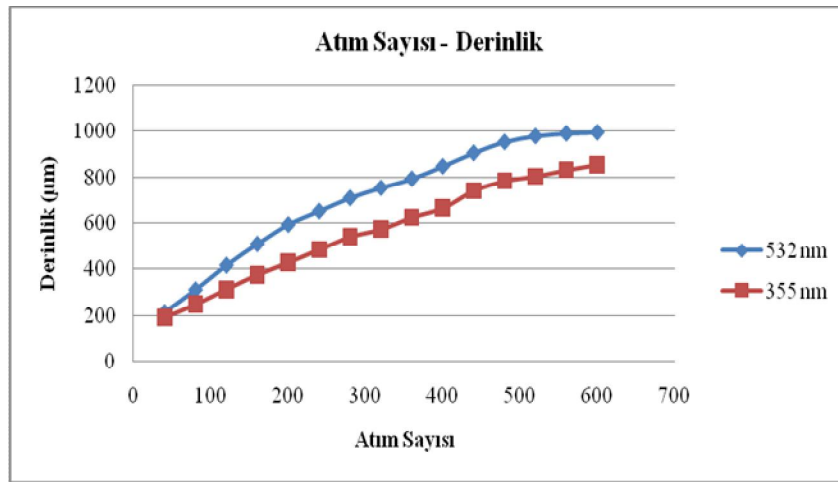


Şekil 5.3: Odaklama sistemi.

PVC üzerine gönderilen lazer ışının çapı 40 μm civarında olması istendiğinden 1064 nm dalgaboylu ışın için 2,5 mm çaplı iris kullanılarak ışın çapı 2,5 mm’ye indirildikten sonra, odağı 75 mm olan ince kenarlı mercekten geçirilerek çapı 40 μm civarında olan ışın PVC üzerine düşürülmüştür. 532 nm dalgaboylu ışın için 5 mm çaplı iris kullanılarak ışın çapı 5 mm’ye indirildikten sonra odağı 300 mm olan ince kenarlı mercekten geçirilerek çapı 40 μm civarında olan ışın PVC üzerine düşürülmüştür. 355 nm dalgaboylu ışın için 5 mm çaplı iris kullanılarak ışın çapı 5 mm’ye indirildikten sonra odağı 500 mm olan ince kenarlı mercekten geçirilerek çapı 40 μm civarında olan ışın PVC üzerine düşürülmüştür.

Deneylerde kullanılan lazerin atım süresi 6 ns olduğundan, 6 ns’lik atımlar malzeme üzerine üst üste gönderilerek malzeme üzerinde kavite oluşturulmuştur. Lazer ışını

malzeme üzerine gönderildiğinde, lazer ışını ile malzeme arasındaki etkileşme lineer olmadığından atım sayısı malzeme işlemeyi etkileyen bir parametredir. Atım sayısı artırıldıkça delik kavite derinliği de artmaktadır. 6 ns atım süreli, 532 nm dalgaboylu ışına 40 atımdan başlayarak 40, 80, 120, ..., 600 atım aralığında 5 Hz tekrarlama oranı ile malzeme üzerine gönderilmiştir. Şekil 5.4’de görüldüğü gibi atım sayısı arttıkça derinliğin arttığı gözlenmiştir. Derinliğin artması 160 atım sayısından sonra doğrusallığını kaybetmeye başladığından bu atım sayısı referans alınmıştır [17].



Şekil 5.4: Atım sayısının derinliğe etkisi [17].

Deneylerde amaç delik elde etmek değil, elde edilecek deliğin derinlik-genişlik olarak en yüksek değere ulaşacak optimum parametrelerinin elde edilmesi olduğundan deneylerde kavite oluşumu istenmiştir.

5.1. Deneysel çalışma, ölçüm ve gözlemler

Yapılan denemelerde dalgaboyu 355 nm, 532 nm ve 1064 nm olmak üzere üç farklı dalgaboyu kullanılmıştır. Yapılan deneyin, parametreleri ve seviyeleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2: Deneyleerdeki parametreler ve seviyeler.

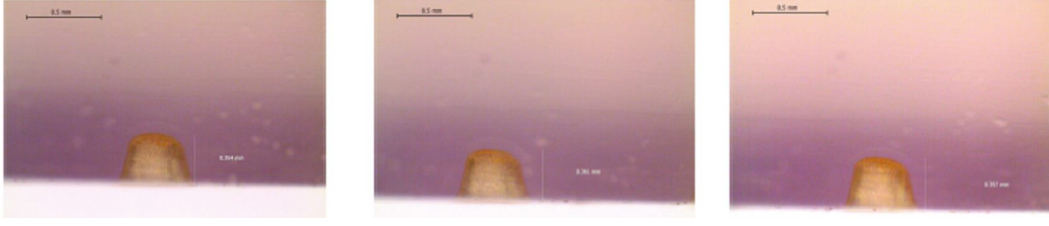
	1	2	3
Dalgaboyu (nm)	355	532	1064
Enerji (mJ)	10	20	30
Frekans (Hz)	6	8	10

Yapılan 9 deney için belirtilen parametre kombinasyonları ortogonal dizin şeklinde düzenlenerek Tablo 5.3 'de gösterilmiştir.

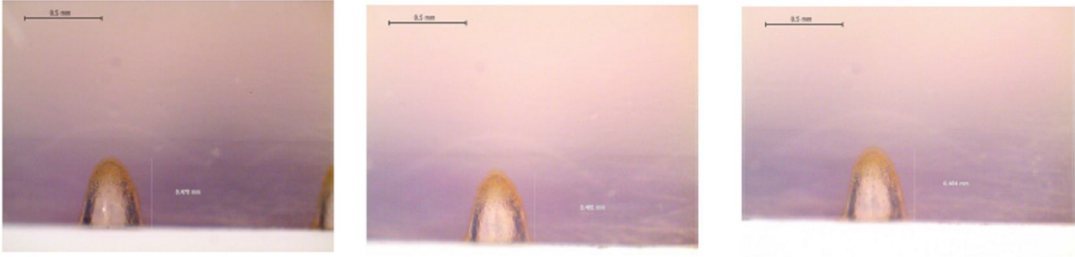
Tablo 5.3 : Deney seviyelerinin deney numaralarına göre dağılımı.

Deney No	Dalga Boyu (nm)	Enerji (mJ)	Frekans (Hz)
1	355	10	6
2	355	20	8
3	355	30	10
4	532	10	8
5	532	20	10
6	532	30	6
7	1064	10	10
8	1064	20	6
9	1064	30	8

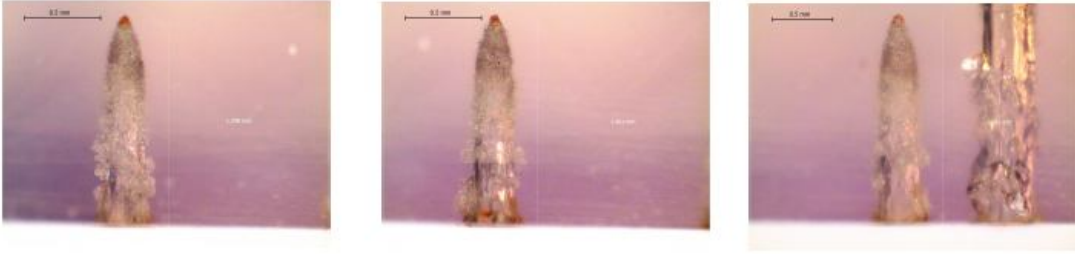
Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kavitelelerin optik mikroskopta alınan görüntüleri Şekil 5.5'ten Şekil 5.22'ye kadar gösterilmiştir. Şekil 5.5'ten Şekil 5.13'e kadar olan resimlerde malzeme üzerinde oluşan kavitenin optik mikroskopta alınan kesit görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.14'ten Şekil 5.22'ye kadar olan resimlerde malzeme üzerinde oluşan kavitenin üstten alınan optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapılan deneylerde hata oranını azaltmak amacıyla her bir denemeden 5'er tane tapılmıştır. Görüntülerden elde edilen derinlik-genişlik oranlarından en küçük ve en büyük değerler çıkartılarak geri kalan üç sonuç dikkate alınmıştır.



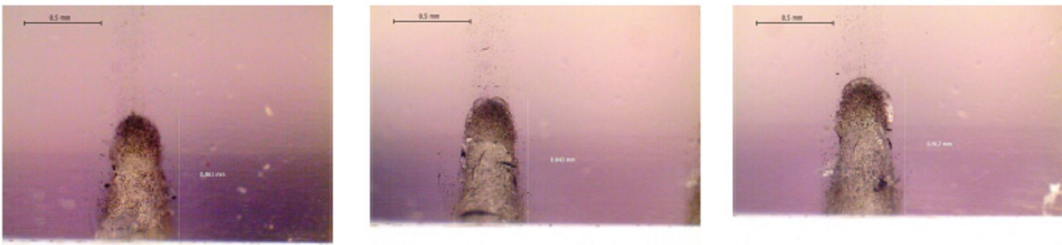
Şekil 5.5: Tablo 5.3’de verilen 1 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 10 mJ, frekans 6 Hz’dir.



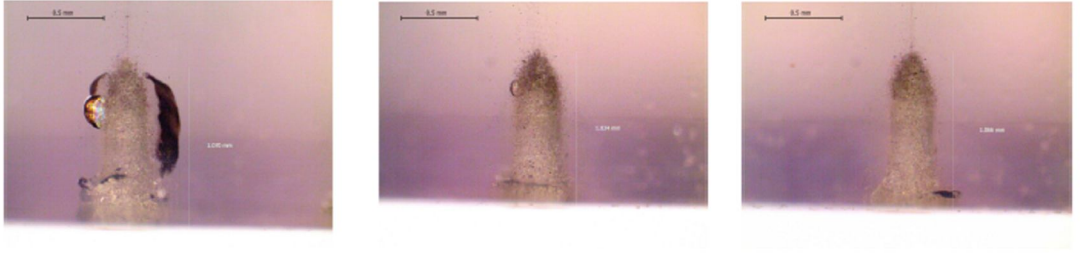
Şekil 5.6: Tablo 5.3’de verilen 2 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 20 mJ, frekans 8 Hz’dir.



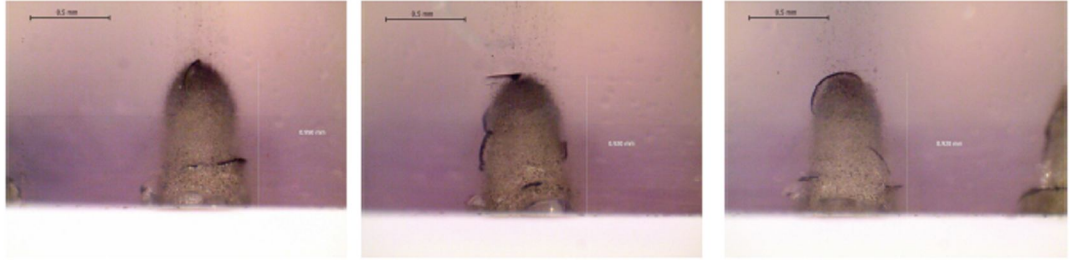
Şekil 5.7: Tablo 5.3’de verilen 3 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 30 mJ, frekans 10 Hz’dir.



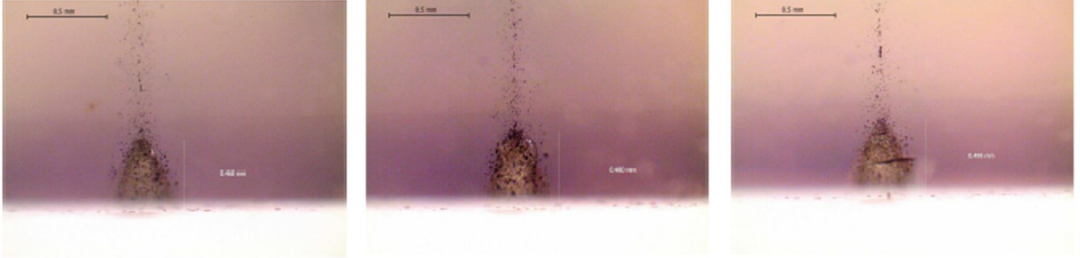
Şekil 5.8: Tablo 5.3’de verilen 4 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 10 mJ, frekans 8 Hz’dir.



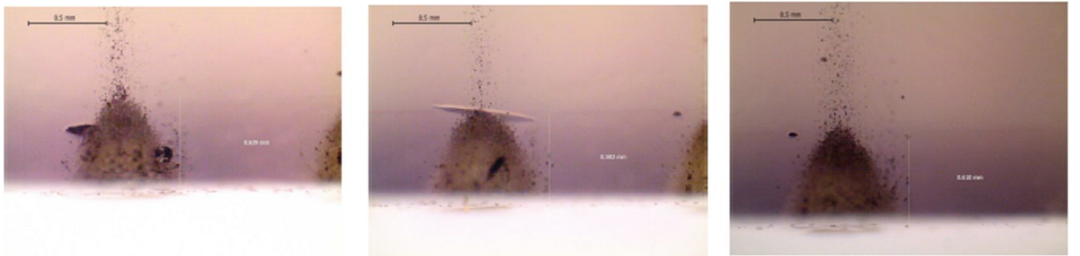
Şekil 5.9: Tablo 5.3’de verilen 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 20 mJ, frekans 10 Hz’dir.



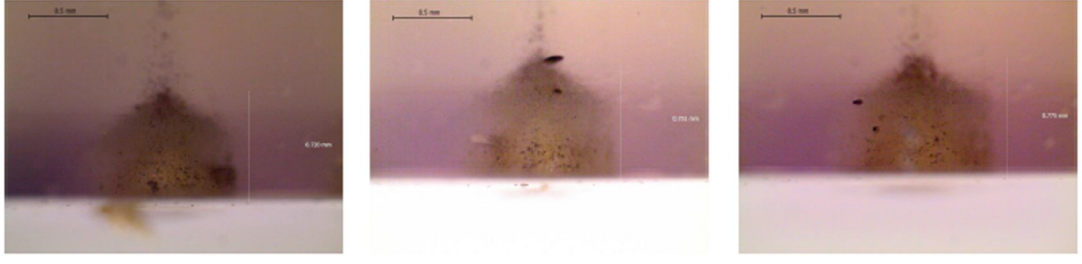
Şekil 5.10: Tablo 5.3’de verilen 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 30 mJ, frekans 6 Hz’dir.



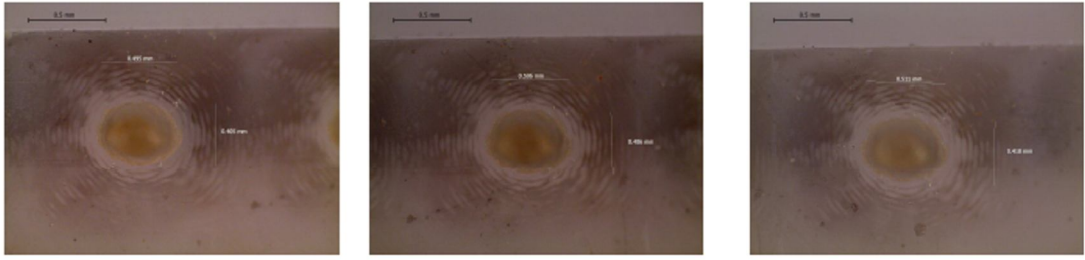
Şekil 5.11: Tablo 5.3’de verilen 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 10 mJ, frekans 10 Hz’dir.



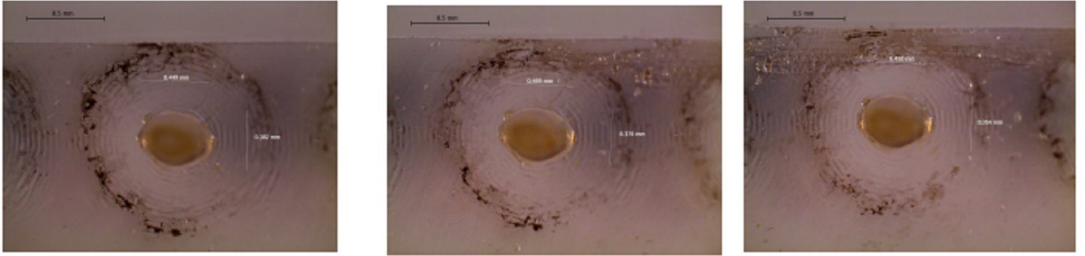
Şekil 5.12: Tablo 5.3’de verilen 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. Polimer malzeme üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 20 mJ, frekans 6 Hz’dir.



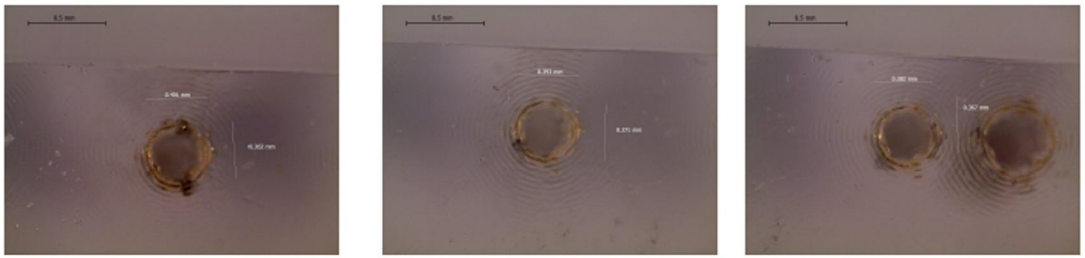
Şekil 5.13: Tablo 5.3’de verilen 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 30 mJ, frekans 8 Hz’dir.



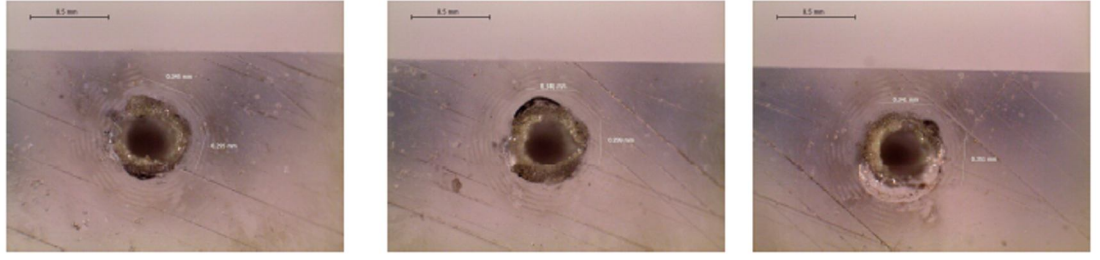
Şekil 5.14: Tablo 5.3’de verilen 1 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 10 mJ, frekans 6 Hz’dir.



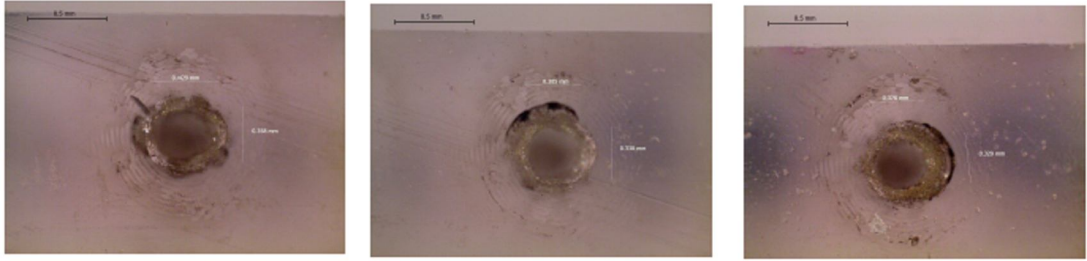
Şekil 5.15: Tablo 5.3’de verilen 2 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 20 mJ, frekans 8 Hz’dir.



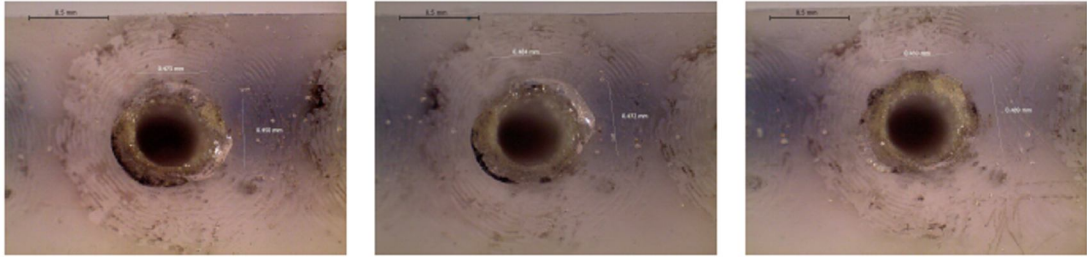
Şekil 5.16: Tablo 5.3’de verilen 3 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 355 nm, enerji 30 mJ, frekans 10 Hz’dir.



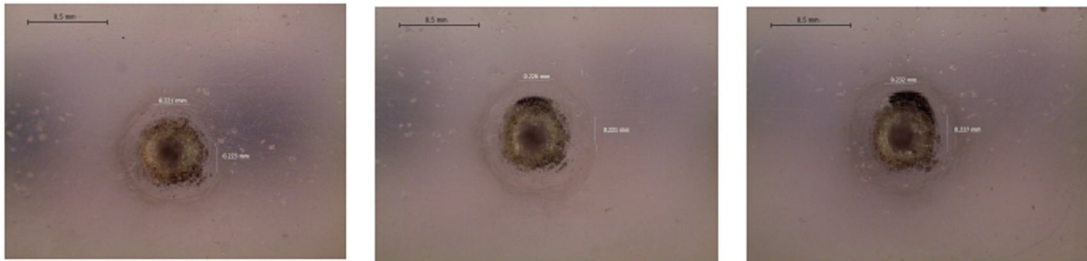
Şekil 5.17: Tablo 5.3’de verilen 4 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 10 mJ, frekans 8 Hz’dir.



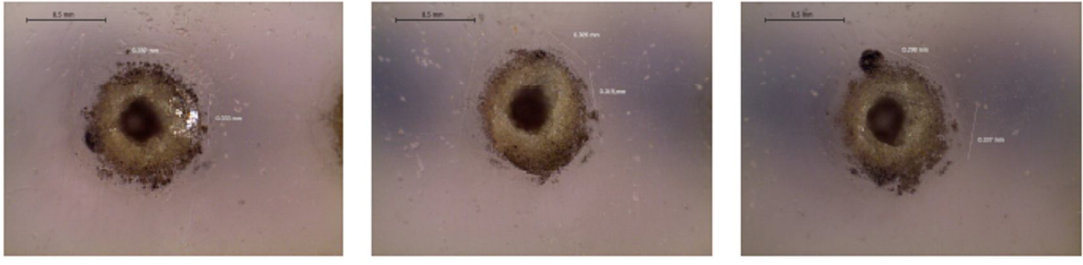
Şekil 5.18: Tablo 5.3’de verilen 5 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu 532 nm, enerji 20 mJ, frekans 10 Hz’dir.



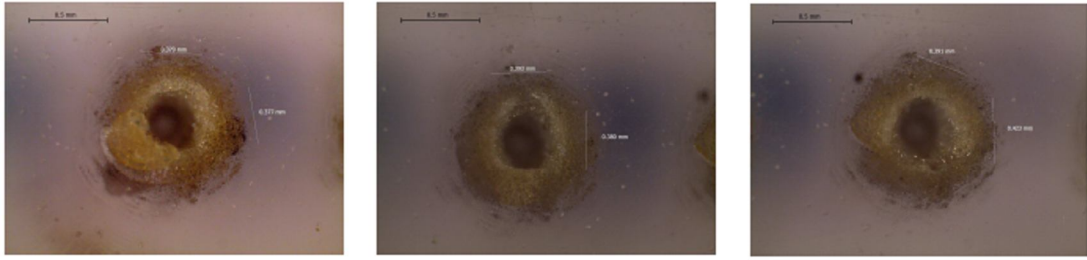
Şekil 5.19: Tablo 5.3’de verilen 6 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 30 mJ, frekans 6 Hz’dir.



Şekil 5.20: Tablo 5.3’de verilen 7 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 10 mJ, frekans 10 Hz’dir.



Şekil 5.21: Tablo 5.3’de verilen 8 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 20 mJ, frekans 6 Hz’dir.



Şekil 5.22: Tablo 5.3’de verilen 9 numaralı deneyde elde edilen optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 1064 nm, enerji 30 mJ, frekans 8 Hz’dir.

Şekil 5.5’ten şekil 5.22’ye kadar olan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak kavite derinlik-genişlik oranları resimler üzerinden hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler tablo 5.4’te verilmiştir.

Tablo 5.4: Şekil 5.5’ten Şekil 5.22’ye kadar olan optik mikroskop görüntülerinden faydalanılarak hesaplanan kavite derinlikleri ve genişlikleri.

	DERİNLİK (μm)			GENİŞLİK (μm)		
	D1	D2	D3	G1	G2	G3
1	354	361	357	450	456	464
2	470	481	484	416.5	414.5	402
3	1.398	1.401	1.374	381.5	382	374.5
4	861	843	912	320	322	346
5	1.070	1.034	1.066	393.5	371	353
6	950	920	920	462	478	479
7	468	480	499	216.5	222	234.5
8	639	582	610	344	314	317.5
9	720	751	775	378.5	36.5	407

Tablo 5.4'ten hesaplanan derinlik ve genişlikler kullanılarak hesaplanan derinlik- genişlik oranları ve ortalama derinlik- genişlik oranları Tablo 5.5 'de gösterilmiştir.

Tablo 5.5: Tablo 5.4'ten elde edilen ortalama derinlik- genişlik oranları.

Deney	D1/G1	D2/G2	D3/G3	Ortalama D/G
1	0.79	0.79	0.77	0,78
2	1.13	1.16	1.20	1,16
3	3.66	3.67	3.67	3,67
4	2.69	2.62	2.64	2,65
5	2.72	2.79	3.02	2,84
6	2.06	1.92	1.92	1,97
7	2.16	2.16	2.13	2,15
8	1.86	1.85	1.92	1,88
9	1.90	1.94	1.90	1,91

6. PVC'NİN LAZERLE DELİNMESİNDE OPTİMUM PARAMETRELERİNİN TAGUCHİ METODU İLE BELİRLENMESİ

6.1. Giriş

Lazerle delme parametrelerinin klasik deney tasarımı yöntemleri ile belirlenmesi çok zaman almakta ve aynı zamanda yüksek maliyet göstermektedir. Bu zorluklar sebebi ile bu çalışmada Taguchi Metodu kullanılarak daha az deneyle ve maliyetle optimum parametreler belirlenmiştir.

6.2. Taguchi Metodu

Temel olarak deney tasarımı yöntemleri yüzyıl başında tarımsal araştırmalarda kullanılarak Fischer tarafından geliştirilmiştir [30,31]. Mühendislik ve araştırma-geliştirme çalışmalarında ulaşılmak istenen başlıca hedef gerek tasarlanan sistemin, gerekse geliştirilmek istenen ürünün maksimum performansa sahip olmasıdır. En iyi sonuçların elde edileceği şartları ortaya koyabilmek için öncelikle performansı belirleyen özellik belirlenir ve bu özelliği etkileyen faktörler incelenir. Ardından bu faktörlerin performansı belirleyen özellik üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi ve en uygun kombinasyonunun bulunması için (kontrol edilemeyen faktörler de gözetilerek) deneyler yapılır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen performans göstergesi değerlendirilerek optimum şartlar tespit edilir. Bu yaklaşım çerçevesinde yapılan deneyler sisteme sorulan soru, deney sonuçları da sistemin verdiği cevap olarak algılanabilir. Kritik olan nokta ise doğru cevabı alabilmek için doğru sorunun sorulmasının gerekliliğidir [28].

Genelde yukarıda açıklanan durumlarda uygulanan soru sorma tekniği, her faktörü teker teker ele almak ve her faktörün sistem üzerindeki etkilerini ayrı ayrı tespit etmektir. Ancak böyle bir yaklaşımda faktörler arasındaki etkileşimler göz ardı edilmiş olacaktır ve bir faktörün etkisinin değerlendirilmesi sırasında diğer

faktörlerin buldukları seviyelerin sonuçlar üzerinde yarattığı etki yanıtıcı olacaktır. Bundan farklı bir yaklaşımla mümkün olan tüm kombinasyonların denenmesi ise yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacak, hatta çoğu kez uygulanması mümkün olmayan bir durumdur. Tüm bunların yanı sıra sadece gerekli deneyleri gerçekleştirmek ve sonuçları değerlendirmek değil, ayrıca sonuçların analizinde uygun istatistiksel yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Çünkü doğal olarak gerçekleştirilecek her deney bir belirsizlik ve hata payı içerecektir [28].

Endüstriyel şartlar göz önüne alındığında hem bu deneyleri ekonomik şartlar ve zamansal kısıntıları gözeterek en verimli şekilde gerçekleştirebilmek, hem de sonuçları doğru yorumlayabilmek için (kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler ile çıktılar arasındaki ilişkiyi tespit edebilmek ve optimizasyonu gerçekleştirebilmek için) başka bir yöntemin geliştirilmesi gerekiyordu. Tasarım yada geliştirme çalışmalarında deney tasarımı yöntemi ile bir çok alanda yararlı sonuçlar elde edilmiştir. Ancak her aşamada tek bir faktör değiştirilerek yada olası bütün kombinasyonların denenmesi yoluyla gerçekleştirilen, özellikle faktör ve seviye sayısının fazla olduğu durumlarda deney tasarımı yöntemi kullanılamamaktadır. Klasik deney tasarımı çalışmalarının yüksek maliyetli olması, uzun zaman gerektirmesi ve uygulamada ki zorlukları nedeniyle, 1986 tarihinde Genichi Taguchi kendi adıyla anılan Taguchi Metodu yaklaşımını ortaya atmıştır [27,29].

Taguchi Metodu ile deney öncesinde yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısını önemli şekilde düşürmek mümkün olmuştur. Taguchi Metodu uygulaması son derece verimli bir yaklaşımdır. Ayrıca kalite ve verimliliği artırmak amacıyla uygulanan tüm diğer yöntem ve metotları destekleyici, yönlendirici rolü vardır. Taguchi Metodu bir deney tasarım tekniği olmanın ötesinde yüksek kalitede sistem tasarımı için son derece faydalı bir tekniktir. Diğer taraftan deney sayısında elde edilen azalma, faktörler arasındaki etkileşimlerin belirli ölçüde göz ardı edilmesinden kaynaklanmaktadır.

Taguchi Deney Tasarımı yönteminde elde edilen deney sonuçları sinyal/gürültü (S/N) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. Sinyal/Gürültü oranı değeri; "küçük

değer iyi”, “büyük değer iyi”, “nominal değer iyi” olarak kalite değerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanır ve analiz edilir [27].

Bunun yanı sıra varyans analizi (Anova) ile hangi proses üzerinde hangi faktörlerin ne derecede önemli oldukları istatistiksel olarak ortaya konulur [31]. Hem S/N oranı, hem de varyans analizi yardımı ile de faktörlerin, prosesi optimum performansa ulaştırarak kombinasyonu tespit edilir.

Diğer önemli bir nokta ise deney tasarımı üzerine kurulan sistemlerin dengeli olmasıdır, yani faktörlerin birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmesini sağlaması ve bunun için de tasarımda faktörlerin farklı seviyeleri için her test edilen şart altında eşit sayıda örnekleme yapılmasıdır. Taguchi'nin standart tasarımları bu sistem üzerine kurulmuştur [32].

Taguchi Deney Tasarımı tekniğine göre yapılacak bir çalışmada izlenecek adımlar :

- a. Faktörlerin seçimi ve aralarındaki etkileşimlerin değerlendirilmesi (beyin fırtınası, akış diyagramı, sebep sonuç diyagramı gibi metotlar kullanılarak).
- b. Faktörlerin seviyelerinin belirlenmesi.
- c. Doğru dengeli tasarımın seçimi.
- d. Faktörlerin ve/veya aralarındaki etkileşimlerin dengeli deney düzenindeki kolonlarla eşleştirilmesi.
- e. Deneylerin daha önceki adımlarda planlanan şekilde gerçekleştirilmesi.
- f. Sonuçların analizi.
- g. Onama deneylerinin yapılması [31].

Bu adımların izlenmesi sonucunda proses veya ürün için optimum performansın elde edileceği deney parametreleri belirlenecek, deneyde ele alınan faktörlerin kalite değeri üzerindeki etkisi tahmin edilebilecek ve optimum deney parametreleri sonucunda elde edilebilecek kalite değeri öngörülebilecektir.

6.2.1. Değerlendirilecek faktör ve etkileşimlerin seçilmesi

Var olan problemin çözümüne ilişkin amaç ortaya konduktan sonra, klasik tasarımda olduğu gibi, beyin fırtınası, süreç akış şeması ve sebep-sonuç diyagramı gibi yöntem ve teknikler kullanılarak, değerlendirmeye alınacak faktör veya etkileşimler seçilmektedir. Taguchi, faktörleri kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen (gürültü) faktörler olarak ikiye ayırmaktadır. Faktör düzeyleri belirlenmeden önce faktörler belirlenmekte ve kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörler olarak ayrılmaktadır. Kontrol edilebilen faktör sayısına göre tasarım belirlenmekte ve denemeler yapılmaktadır [27].

Üç değişik faktörden her biri en düşük, en yüksek ve orta değer olmak üzere 3 seviyeli olarak belirlenmiştir. Yapılacak deneylerde incelenilmesi düşünülen faktörler ve seviyeleri Tablo 6.1'deki gibi öngörülmüştür.

Tablo 6.1: Deneylerdeki faktörler ve seviyeler.

Faktörler /Seviyeler		1	2	3
A	Dalgaboyu (nm)	355	532	1064
B	Enerji (mJ)	10	20	30
C	Frekans (Hz)	6	8	10

6.2.2. Uygun ortogonal dizinin seçilmesi

Ortogonal dizinin kullanımı sadece Taguchi'ye mahsus değildir. Ancak Taguchi, kullanımları basitleştirmiştir. Ortogonal dizinin ilk kullanılması, 1930'lu yıllarda, İngiltere'de Fisher tarafından olmuştur. Ortogonal dizi, dengelenmiş dizi anlamında kullanılmaktadır [34].

Taguchi, çok sayıda deneysel durumu açıklamak için ortogonal dizileri oluşturmuştur. Ortogonal dizinin en önemli özelliği, birçok faktörün en az sayıda test

edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirme yapmaya olanak sağlamasıdır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre, 2 kademeli, 3 kademeli, 2 ve 3 kademeli olarak belirlenmektedir. Ortogonal dizilere tasarım matrisi de denilmektedir.

Genel gösterimi;

d: Toplam deney sayısı,

a: Faktörlerin düzey sayısı

k: Faktör sayısı

L: Ortogonal dizin olmak üzere,

$L_d(a)^k$ yada L_d şeklinde ifade edilmektedir.

Genel olarak kullanılan diziler 2 seviyeliler için L_4 , L_8 , L_{16} ve L_{32} , 3 seviyeliler için L_9 , L_{18} ve L_{27} dizileri olmaktadır. Dizilerin seçimi düzey sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır. Ortogonal dizi, ürün ortalaması ve varyansında etkili olan birçok faktörle aynı anda ve daha kısa sürede çalışmayı sağlamaktadır.

Ortogonal dizinler tam faktöriyel tasarım gereği (2^k veya 3^k) çok sayıda yapılması gereken denemeleri büyük oranda azaltmaktadır. Tam faktöriyel tasarıma göre $3^3=27$ adet deneme yapılması gerekirken, ortogonal dizinler sayesinde deneme sayısı 9'a (tablo 6.2) düşmektedir [34].

Tablo 6.2: L_9 ortogonal dizini.

Deney	A Faktörü	B Faktörü	C Faktörü
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Bu çalışmada 3 faktörlü 3 seviyeli deney için Taguchi yöntemine göre L₉ ortogonal dizin kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde normalde 3³=27 adet deney yapılması gerekirken 9 deney yapılmıştır. Bu deneyler Tablo 6.3'te verilmiştir.

Tablo 6.3 : Taguchi L₉ ortogonal dizin.

Deney No	Faktör A	Faktör B	Faktör C
	Dalga Boyu (nm)	Enerji (mJ)	Frekans (Hz)
1	355	10	6
2	355	20	8
3	355	30	10
4	532	10	8
5	532	20	10
6	532	30	6
7	1064	10	10
8	1064	20	6
9	1064	30	8

6.2.3. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı

Taguchi Deney Tasarımı metodunda kalite karakteristiklerinin ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan ölçüt, ölçülmek istenen sinyalin (S), gürültü faktörüne (N) oranıdır. Sinyal değeri sistemin verdiği ve ölçülmek istenen gerçek değeri, gürültü faktörü ise ölçülen değer içerisindeki istenmeyen faktörlerin payını temsil eder. Sinyal/gürültü oranının hesaplamasında deneyler sonucunda ulaşılmaması hedeflenen kalite değerinin özelliği de önemlidir. Burada temel üç önemli kategori söz konusudur:

- düşük değer iyi (hedef en düşük değere ulaşmaktır)
- yüksek değer iyi (hedef en yüksek değere ulaşmaktır)
- nominal değer iyi (hedef nominal bir değere ulaşmaktır)

Yapılan araştırmada söz konusu olan PVC malzeme üzerinde elde edilecek en yüksek derinlik-genişlik oranı istenilmektedir. Bu deneylerin analizinde “yüksek değer iyi” yaklaşımına göre hesaplanan sinyal/gürültü oranı kullanılacaktır [32,33].

Bu yaklaşıma göre S/N oranını hesaplamakta kullanılacak olan yüksek değer iyi denklemi:

$$\eta = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (6.1)$$

Her deney için ölçülen derinlik-genişlik oranı değeri üzerinden eşitlik 6.1 yardımıyla sinyal/gürültü oranları hesaplanır. Denklemden y , o deney şartlarında ölçülen karakteristik değeri (derinlik-genişlik oranını), n ise o deney şartlarında yapılan deney sayısını ifade etmektedir [31,32].

Yapılan deney sonuçlarına göre bulunan derinlik-genişlik oranları ve eşitlik 6.1'e göre derinlik-genişlik oranı kullanılarak hesaplanan S/N oranları Tablo 6.4'te belirtilmiştir.

Tablo 6.4: Taguchi L₉ deney tasarımına göre deney sonuçları ve S/N oranı.

FAKTÖR SEVİYELERİ					
DENEY NU.	Dalgaboyu (nm)	Enerji (mJ)	Frekans (Hz)	D/G (Derinlik-Genişlik) oranı	S/N oranı (db)
1	355	10	6	0.78	-2.16
2	355	20	8	1.16	1.29
3	355	30	10	3.67	11.30
4	532	10	8	2.65	8.46
5	532	20	10	2.84	9.07
6	532	30	6	1.97	5.89
7	1064	10	10	2.15	6.65
8	1064	20	6	1.88	5.48
9	1064	30	8	1.91	5.62
Toplam ortalama S/N oranı					5.73

6.2.4. Deneý sonuçlarının Taguchi Metodu ile optimizasyonu

Bulunan bu sonuçlar ile her faktörün her seviyedeki etkisinin ayrıştırılması gerekir. Bunun için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için ayrı ayrı alınır. Örneğin enerjinin 10 mJ olduğu birinci seviyeye ait oranı belirlemek için 1, 4 ve 7 numaralı deneyler için hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması alınır.

Tablo 6.5’de tüm faktörler ve seviyeler için bu şekilde hesaplanmış ortalama sinyal/gürültü oranları verilmiştir. En yüksek değerlerin altları belli olması için çizilmiştir. Bunların yanı sıra yapılan toplam 9 deneyin toplam sinyal/gürültü oranı da hesaplanır. Toplam ortalama sinyal/gürültü oranı eşitlik (6.2) ile elde edilir [35].

$$\eta_m = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.2)$$

Tablo 6.5: Faktör seviyelerinin ortalama S/N oranları.

Faktörler/Seviyeler	Ortalama S/N oranları		
	1. seviye	2.seviye	3.seviye
Dalga boyu (nm)	3.48	<u>7.81</u>	5.92
Enerji (mJ)	4.32	5,28	<u>7.60</u>
Frekans (Hz)	3.07	5.12	<u>9.00</u>
Toplam ortalama S/N oranı	5.73		

Bütün bu hesaplamalar sonucunda her faktör için belirlenen en yüksek sinyal/gürültü oranı en iyi deney sonucuna, yani derinlik-genişlik oranının en yüksek olduğu deney sonucuna işaret eder. Optimizasyon aşamasını sonuçlandırmak için ise hesaplanan sinyal/gürültü oranlarından yola çıkarak varyans analizi gerçekleştirilir.

6.2.4.1. Varyans analizi (Anova)

Varyans analizinde hedeflenen, incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçebilmek için seçilen çıktı değerini (derinlik-genişlik oranını) ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını ortaya koyabilmektir. Bunun yanı sıra elde edilen sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliği de test edilir. Bu amaçla öncelikle Eşitlik (6.3)'e göre sinyal/gürültü oranının toplam değişkenliğini belirten SS_T değeri (toplam karelerin toplamı) hesaplanır [35].

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (6.3)$$

Burada;

η_i = Ölçülen derinlik-genişlik oranları üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranı.

η_m = Ölçülen derinlik-genişlik oranları üzerinden hesaplanan sinyal/gürültü oranlarının ortalaması.

n = toplam deney sayısı.

SS_T değeri üç faktörün ayrı ayrı her faktörün karelerinin toplamı değerlerinin ($SS_T=SS_A+SS_B+SS_C$) toplamından oluşmaktadır. Her faktörün karelerinin toplamının Eşitlik 6.4 yardımıyla ayrı ayrı hesaplanması sonucu ortaya çıkan değerler tablo 6.6'da gösterilmiştir [35].

$$SS_A = \sum_{i=1}^{k_A} n_{A_i} * (\eta_{A_i} - \eta_m)^2 \quad (6.4)$$

k_A = A faktörünün seviye sayısı.

n_{A_i} = A faktörünün i seviyesindeki deney sayısı.

η_{A_i} = A faktörünün i seviyesindeki S/N oranı.

η_m = Ortalama S/N oranı.

Bir sonraki adımda ise her deney faktörünün deney sonuçlarını ne ölçüde etkilediğini gösterebilmek için F-Testi adı verilen hesaplama yapılır. Bu testten önce her faktörün serbestlik derecelerinin belirlenmesi gerekir. Bir faktörün serbestlik derecesi, o faktörün seviyesinin bir eksigidir. Faktör seviyeleri serbestlik dereceleriyle ilişkili bir fonksiyondur. Serbestlik derecesi, faktör seviyelerinden hareketle hesaplanmaktadır. Serbestlik derecesi, deneyin büyüklüğünü tespit etmek açısından önemlidir [27]. Örneğin dalgaboyu için seviye sayımız 3 (355 nm, 532 nm, 1064 nm) olduğu için serbestlik derecesi 2'dir. F-Testinde karelerin toplamındaki (SS_i) her bileşen için karelerin toplamı değeri o faktörün serbestlik derecesine bölünür ve ortalama karelerin toplam değeri belirlenir (Tablo 6.6).

Değerlendirmede kullanılan diğer bir değer olan her faktörün yüzde olarak toplam değişkenlik üzerindeki etkisi ise her faktörün karelerin toplamı değerinin toplam karelerin toplamı değerine bölünmesi ile bulunur ve o faktörün deney sonuçlarına katkısının tüm faktörler içerisindeki oranını gösterir [31,32].

Tablo 6.6: Taguchi L₉ deney tasarımına göre Anova tablosu

Faktörler	Serbestlik Derecesi	Karelerin Toplamı (SS _i)	Ortalama Karelerin Toplamı (Varyans)	Faktör Etkisi (%)
Dalga boyu (nm)	2	28.28	14.14	28.34
Enerji (mJ)	2	17.07	8.54	17.11
Frekans (Hz)	2	54.42	27.21	<u>54.55</u>
Toplam	6	99.77		100

6.2.4.2. Sonuçların optimizasyonu

Tablo 6.5'e göre her bir faktör için sinyal/gürültü oranının en yüksek olduğu seviyeler dalga boyunda 532 nm, enerjide 30 mJ, frekans da ise 10 Hz.'dir. Optimum nokta olarak tavsiye edilen kombinasyon böylelikle dalga boyu 532 nm, enerjisi 30 mJ ve frekansı 10 Hz olan bir lazer demeti olmaktadır. Sinyal/gürültü oranları

kullanılarak belirlenen bu optimum nokta için beklenen derinlik-genişlik oranını hesaplamak mümkündür. Her faktör için belirlenen optimum seviye için hesaplanan ortalama sinyal/gürültü oranı değeri ve toplam ortalama sinyal/gürültü oranı değeri kullanılarak eşitlik 6.5 yardımı ile hesaplama yapıldığında bu deney şartları altında oluşması beklenen sinyal/gürültü oranı 12.95'dir. Bu hesaplama yapılırken sadece sistem üzerinde önemli etkisi bulunan faktörlerin kullanılması gerekirken, incelenen sistemde her üç faktörün de çıktı değeri olan derinlik-genişlik oranı üzerinde önemli etkisi olduğu için her üçü de hesaplama dahil edilmiştir. Tahmin edilen sinyal/gürültü oranı üzerinden yapılan hesaplama ile karşımıza çıkan optimum deney kombinasyonu için tahmin edilen derinlik-genişlik oranı değeri 4.44'dür (Tablo 6.7) [35].

$$\eta = \eta_m + \sum_{i=1}^j (\eta_i - \eta_m) \quad (6.5)$$

Burada:

η : Oluşması beklenen S/N oranı.

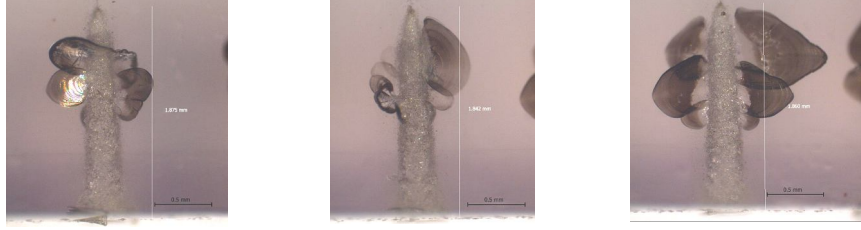
η_m : Ortalama S/N oranı.

η_i : Her faktörün en iyi seviyesi için hesaplanan S/N oranı.

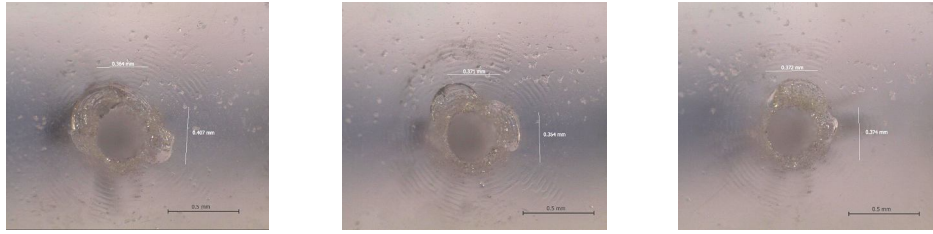
j : Faktör sayısıdır.

Tablo 6.6'da varyans analizi sonucunda üç parametreden en çok frekansın, %54.55 oranı ile PVC delmede etkili olduğu hesaplanmıştır. İkinci olarak ise dalgaboyunun %28.34 oranı ile PVC delmede etkili olduğu hesaplanmıştır. Bu parametrelerden en az ise enerjinin %17.11 oranı ile PVC delmede etkisi olduğu hesaplanmıştır.

Taguchi Metodu ile belirlenen optimum parametreler kullanılarak yapılan doğrulama deneyinin sonucunda elde edilen kavitelerin optik mikroskop görüntüleri şekil 6.1 ve 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Tablo 6.7’de elde edilen optimum parametreler kullanılarak elde edilen kavitenin optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin kesit görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 30 mJ, frekans 10 Hz’dir.



Şekil 6.2: Tablo 6.7’de elde edilen optimum parametreler kullanılarak elde edilen kavitenin optik mikroskop görüntüleri. PVC üzerine açılan deliğin üstten görüntüsü. Dalgaboyu: 532 nm, enerji 30 mJ, frekans 10 Hz’dir.

Taguchi Metodu ile belirlenen optimum parametreler ve değerler kullanılarak gerçekleştirilen doğrulama deneyi sonuçları ve Taguchi Metodunun güvenilirliği tablo 6.7’de gösterilmiştir.

Tablo 6.7: Taguchi Metoduyla elde edilen optimum seviye ve değerlerin kıyaslanması.

Faktörler	Optimum Seviyeler	Optimum Değerler (teorik)	Doğrulama Deney Sonuçları	Taguchi ile Kıyaslama(%)
Dalga boyu (nm)	2	532	532	532
Enerji (mJ)	3	30	30	30
Frekans (Hz)	3	10	10	10
Optimum S/N Oranı		12.95	13.94	%93
Optimum D/G Oranı		4.44	4.98	%90

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı PVC' nin lazerle delme işleminde, en iyi derinlik genişlik oranının elde edilmesi için optimum parametrelerin Taguchi Metodu ile belirlenmesidir.

Çalışmanın deneysel kısmında lazerle delinen PVC' deki deliklerde yüksek derinlik- genişlik oranı elde etmek için delmeyi en çok etkileyen parametrelerin belirlenmesi gereklidir. Buna göre üç seviyeli olarak üç parametre belirlenmiştir (Tablo 5.2). Bu parametreler kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen gözlemler ve hesaplamalar yüksek çözünürlüklü optik mikroskopla yapılmıştır. Her deney için optik mikroskopla alınan 5 görüntüden en yüksek ve en düşük derinlik- genişlik oranına sahip deneyler iptal edilerek, 3 deney hesaplamalarda dikkate alınmıştır (Tablo 5.4).

Bu çalışmanın ana amacı lazerle delmede, yüksek derinlik/ genişlik oranına ulaşmak için optimum parametreleri belirlemek olduğundan Taguchi Metodunda bu amaca ulaşabilmek için “en yüksek değer iyi” yöntemi göz önüne alınmıştır. Taguchi Metoduyla çalışmamızda kullandığımız 3 farklı değişken ve 3 farklı değer ile yapılması gereken deney sayısı 27 ($3^3 = 27$) iken Taguchi Metodunu kullanarak bu sayı ortogonal dizi şeklinde 9 deneye düşürülmüştür (Tablo 6.3).

Yapılan deney sonuçları incelendiğinde en yüksek değeri, tablo 6.4'de 3 numaralı deneyin verdiği gözlemlenmiştir. Bu değerler derinlik/ genişlik oranı olarak 3.67 ve sinyal/ gürültü oranı olarak 11.30 en yüksek değerlerdir.

Taguchi Metodu ile Bölüm 6'da varyans analizi ile optimum parametreler belirlenmiştir. Bu optimum parametreler dalgaboyu 532 (2. seviye), enerji 30 mJ (3. seviye), frekans 10 Hz (3. seviye) olarak bulunmuştur (Tablo 6.7). Bu optimum seviyelere göre yapılan Taguchi Metodu hesaplamasında (eşitlik 6.5 yardımı ile) derinlik/ genişlik oranının 4.44 ve sinyal/ gürültü oranının 12.95 olacağı görülmüştür.

Optimum parametreler kullanılarak yapılan doğrulama deneyi sonucunda ise derinlik/genişlik oranı 4.98 ve sinyal/gürültü oranı 13.94 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre deneysel sonuçların Taguchi Metodu ile %93 oranında uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuca göre Taguchi Metodu ile doğru sonuç, daha az sayıda deneyle bulunmuştur.

Ayrıca varyans (Anova) analizi ile PVC’de lazerle delik oluşumunu; dalgaboyunun %28.34 oranında, enerjinin %17.11 oranında ve frekansın ise %54.55 oranında etkilediği görülmüştür (Tablo 6.6). Bu parametrelerden en çok %54.55 olarak frekansın etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yapılacak diğer çalışmalarda parametrelerin hesaplanan etki oranları dikkate alınarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

Bu çalışmanın sonucundan da anlaşılacağı gibi Taguchi Metodunu kullanarak çok sayıda deney ile ulaşılan hedefe daha az bir deneyle ulaşılabilir. Bir deneydeki optimum parametreler kısa sürede belirlenebilir. Dolayısıyla yapılacak çalışmalarda Taguchi Metodunu kullanmak hem zaman kazandırır, hem de az bir maliyetle istenilen sonuçlar elde edilir.

KAYNAKLAR

- [1] Steen, W., M., “Laser Material Processing”, *Springer-Verlag*, 2-11, (1991).
- [2] Silfast, W., T., “Laser Fundamentals”, First Edition, *Cambridge University*, 1-4,82-190, (1996).
- [3] Lazer nedir [online], <http://www.diyadinnet.com/YararlıBilgiler-1262>, (**Ziyaret Tarihi: 27 Nisan 2011**).
- [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] Dikici, A., Laser Teorisine Giriş, MSB ARGE D.BŞK./NO.84, <http://www.odev-tez.com/odev-11067-laser-osilasyon.html>, (**Ziyaret Tarihi: 18 Nisan 2011**).
- [6] Milonni, P.W. , Eberly , J.H., “Lazerler”, Çeviri: İ., OKUR, *Değişim Yayınları*, İstanbul, (2006).
- [7] Lazer Çeşitleri ve Kullanım Alanları [online], <http://www.fizikportali.com/forum/index.php?topic=681.0#ixzz1Ju7CI2fU>, (**Ziyaret Tarihi: 10 Nisan 2011**).
- [8] “Lazer Cihazlarının İnsan Sağlığı Açısından Değerlendirilmesi ve Zararlı Etkilerinin Giderilmesi” *Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu*, Teknik-Online Dergi Cilt-4, Sayı:3- (2005).
- [9] Combined Research and Curriculum Development Nontraditional Manufacturing (NTM) – Laser Machining Processes [online], 2011, <http://www.mrl.columbia.edu/ntm/>, (**Ziyaret Tarihi: 14 Nisan 2011**).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).

- [13] 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).
- [14] Kulaç, E., “Laser Işını ile Kaynak ve Kesme”, *Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, **11**, (1993).
- [15] Karnakis, D., Laser Microdrilling in Industrial Applications [online], 2011, <http://www.designforlasermanufacture.com/assets/OLmicrodrill.pdf>, (*Ziyaret Tarihi: 1 Mart 2011*).
- [16] Goca, N., “Optik”, Çeviri: Çakır, C., *Kültür Eğitim Vakfı*, 392-438, (1996).
- [17] Candan, L., “Karbon-Fiber Takviyeli Kompozitler ve Polikarbonat Malzemelerin Lazerle Delme Parametrelerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, **1**, (2008).
- [18] Han, W., “Computational and experimental investigations of laser drilling and welding for microelectronic packaging”, Doktora Tezi, *Worcester Polytechnic Institute*, (2004).
- [19] 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).
- [20] Charschan, S., S., “Guide to Laser Materials Processing”, *Laser Institute of America*, 44-55, (1993).
- [21] Verhoeven, J., C., J., “Modelling Laser Percussion Drilling”, Doktora Tezi, *Technische Universiteit Eindhoven*, (2004).
- [22] 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).
- [23] Baysal, B., “Polimer Kimyası”, *O.D.T.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi*, Ankara, (1981).
- [24] Bower, D., “An Introduction to Polymer Physics”, *Cambridge University Press*, UK, (2002).
- [25] “PVC nedir” [online], http://www.multipilan.com.tr/Icerik/pvc_membran_nedir.aspx, (*Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2011*).
- [26] PVC fiziksel ve kimyasal özellikleri [online], <http://www.goodfellow.com/> (*Ziyaret Tarihi: 20 Nisan 2011*).

- [27] Taylan, D., “Taguchi Deneş Tasarımı Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 12/06, (2009).
- [28] Scheffler, E., “Statistische Versuchsplanung und -auswertung, Eine Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung”, *Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart*, ISBN 3- 342-00366-9, 1-50, (1997).
- [29] Baynal, K., Terzi, Ü., “Çoklu Kalite Basarım Özelliklerinin Hedef Programlama Ve Taguchi Yöntemi Kullanılarak Eniyilenmesi”, V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, *İstanbul Ticaret Üniversitesi*, 25-27 ,(2005).
- [30] Montgomery, D. C., “Design and analysis of experiments, 5th Edition”, *John Wiley, Wiley & Sons, New York*, 1-19, (2001).
- [31] Yang W. H., Tarng Y. S., “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 84, 122- 129, (1998).
- [32] Ross, P. J., “Taguchi techniques for quality engineering, loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design”, *McGraw-Hill International Book Company*, ISBN 0-07-053866-2, 1-66, 167-202, (1989).
- [33] Taguchi, G., “Introduction to quality engineering”, *Asian Productivity Organisation, Japan*, ISBN 92-833-1083-7, 97-132, (1990).
- [34] Hamzaçebi, C., Kutay, F., “Taguchi Metodu bir uygulama”, *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Dergisi*, Sayı:3-4, 7-17, (2003).
- [35] Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M., “Deneş tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu” *İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, 80626, Maslak, İstanbul, İTÜ Dergisi, Sayı:3-6, 117-128, (2004).

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Hatay'da doğdu. İlk Öğretimini Yayladağı Yatılı İlk Öğretim Bölge Okulunda (YİBO) tamamladı. Lise öğrenimini Antakya lisesinde 1998 yılında tamamladı. 1998 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nden 2003 yılında mezun oldu. Halen 2006 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine devam etmekte olup evli ve bir kız çocuk babasıdır.