

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

**PLASTİK MALZEMELERİN (PTFE ve POM)
LAZER İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mahir KURT
(Teknik Öğretmen)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa KURT**

**İKİNCİ DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Halil DEMİRER**

İSTANBUL 2006

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

**PLASTİK MALZEMELERİN (PTFE ve POM)
LAZER İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Mahir KURT
(Teknik Öğretmen)
(141101720030506)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE EĞİTİMİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa KURT**

İSTANBUL 2006

ÖNSÖZ

Lazerle işleme teknolojileri hızla gelişen ve uygulama alanları hızla artan bir teknolojidir. Metal malzemelerin işlenmesinde kullanılan lazer teknolojisinin plastik malzemelerin kesilmesinde kullanılması çok fazla uygulama olan bir işlem değildir. Bunun sebebi plastik malzemelerin özelliklerinin farklılık olmasıdır. Kesme işlemi esnasında oluşabilecek hatalardan dolayı maliyeti yüksek olan lazer sistemine zarar verebilir. Ancak bu teknoloji kullanılarak daha hızlı ve hassas kesim yapabildiği için plastik malzemelerin kesilmesi işleminde son yıllarda lazer ile kesildiği akademik çalışmalarında bu yönde olduğu görülmektedir.

Bu tezde PTFE ve POM malzemelerin lazer ile kesilmesi esnasında kullanılan güç, kesme hızı ve basınç değerlerinin optimum değerleri teorik olarak incelenmiştir.

Çalışmalarında maddi ve manevi desteklerinin esirgemeyen danışmanlarım, Prof. Dr. Mustafa Kurt ve Yrd. Doç. Dr. Halil Demirer'e, Prof. Dr. Serdar Salman'a, Yrd. Doç. Dr. Hamdi Sözüo'z'e, Yrd. Doç. Dr. Oğuz Girit'e, Yrd. Doç. Dr. A.Talat İnan'a, Makine Eğitimi Bölümü Araştırma Görevlerine çok teşekkür ederim. Deneylerimin yapılmasında yardımcı olan Form Lazer şirketinin sahibi Muharrem Bey ve çalışanlarına , değerli arkadaşlarım Merve , Duygu , Neşe ve Hatice' ye çok teşekkür ederim

Ocak, 2007

Mahir Kurt

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	VI
ABSTRACT	VIII
SEMBOL LİSTESİ	IX
ŞEKİL LİSTESİ	X
TABLO LİSTESİ	XII
BÖLÜM I. GİRİŞ	1
BÖLÜM II. LAZER IŞINI VE ENDÜSTRİYEL ALANDA KULLANIMI	4
II. 1. IŞIK	4
II.2. ELEKTROMAGNETİK DALGALAR	5
II. 2. 1. Radyo Dalgaları.....	5
II. 2. 2. Mikrodalgalar	5
II. 2. 3. Kızılötesi Dalgalar	5
II. 2. 4. Görünür Işık Dalgaları	6
II. 2. 5. Morötesi Dalgalar	6
II. 2. 6. X-Işımları.....	6
II. 2. 6. Gamma Işımları.....	7
II. 3. LAZER	9
II. 3. 1. Lazer Işığının Özellikleri	9
II. 3. 2. Lazerin Çalışma Prensibi	12
II. 4. LAZERİN ÇEŞİTLERİ.....	14
II. 4. 1. CO 2 Lazeri.....	15
II. 4. 2. Nd: YAG Lazeri.....	21
II. 4. 3. Diyot ve Diyot Pompalı Nd:YAG Lazerler	23

II. 4. 4. Excimer Lazerler	24
II. 5. LAZERLERİN KARSILAŞTIRILMASI	25
II. 6. LAZERİN UYGULAMALARI	27
II. 6. 1. Endüstride Lazerin Başlıca Kullanma Sebepleri	28
II. 6. 2. Endüstride Lazerin Uygulamaları	28
II. 2. 6. 1. Lazer Işını İle Kesmenin Prensibi	29
II. 2. 6. 2. Lazer Işınıyla Kaynağın Prensibi.....	31
II. 2. 6. 3. Lazer Lazer Işınıyla Metal Yüzeylerin Kaplama Prensibi	33
II. 2. 6. 4. Lazer Işınıyla Markalama	36
II. 2. 6. 5. Lazer İle Yüzey Sertleştirme.....	38
II. 2. 6. 6. Lazer Destekli İşlemler	40
II. 2. 6. 7. Lazer Temizleme Sistemleri	42
II. 2. 6. 8. Lazerle Yüzey Parlatma	44
II. 2. 6. 9. Lazer Yardımıyla Şekil Verme	45
II. 7. LASER İLE İŞLEME PARAMETRELERİ	47
II. 7. 1. Lazer Parametreleri	48
II. 7. 1. 1. Lazer Işının Gücü.....	48
II. 7. 1. 2. Güç Yoğunluk Dağılımı.....	48
II. 7. 1. 3. Güç Kaynağı Dengesi	49
II. 7. 1. 4. Lazer Işınının Odaklaması	50
II. 7. 1. 5. Sapma Açısı	52
II. 7. 1. 6. Polarizasyon.....	53
II. 7. 2. Proses Parametreleri	53
II. 7. 2. 1. Kesme Hızı	53
II. 7. 2. 2. Kesme Gazı Tipi	53
II. 7. 2. 3. Gaz Basıncı	54
II. 7. 2. 4. Odaklama Noktası Kesme Hızı	55
II. 7. 3. İş Parçası Parametreleri	55
II. 7. 3. 1. İş Parçası Kalınlığı	55
II. 7. 3. 2. Malzemelerin Özellikleri	56
II. 7. 3. 3. İş Parçası Yüzeyi	56
II. 7. 3. 4. İş Parçasının Geometrisi	57
II. 7. 4. Makine Parametreleri	57
II. 7. 4. 1. Lazer Demetinin Çıkış Aynası	57
II. 7. 4. 2. Işın Ayarı.....	57
II. 7. 4. 3. Işın Yönlendirme Aynaları.....	57
II. 7. 4. 4. Odaklama Mercekleri.....	58
II. 7. 4. 5. Lazer Işını İle Nozul Deliğinin Merkezlenmesi.....	58
II. 7. 4. 6. Odaklama Mercekleri.....	58
II. 7. 4. 7. Nozul Delik Çapı	58
II. 7. 5. Lazer Kesim Sonuçlarının Değerlendirilmesi	58
II. 7. 5. 1. Kerf Genişliği.....	59
II. 7. 5. 2. Yüzey Kalitesi	60
II. 7. 5. 3. Cüruf Şekli	61
II. 7. 5. 4. Isıdan Etkilenen Bölge (HAZ)	62
II. 7. 5. 5. Kesim Çizgileri	63
II. 7. 5. 5. Kesim Yerinin Dikliği	63

BÖLÜM III. PLASTİK MALZEMELERİN (PTF ve POM) LAZER

İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. 64

III. 1. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MATERYALLER ...	64
III. 1. 1. Lazer Kesme Makinesinin Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	64
III. 1. 2. Farklı Lazer Kesim Teknikleri.....	65
III. 1. 2. 1. Fusion (Dağılma) Yöntemiyle Kesme	65
III. 1. 2. 2. Buharlaştırma Yöntemiyle Kesme	66
III. 1. 2. 3. Kimyasal İndirgeme Yöntemiyle Kesme	66
III. 1. 3. Kesilen Parçaların Boyutlarını Ölçmede Kullanılan Aletler	67
III. 1. 4. Kesilen Plastik Malzemelerin Özellikleri	67
III. 1. 4. 1. Teflon Malzemenin Özellikleri	67
III. 1. 4. 2. Delrin (POM) Malzemenin Özellikleri	68
III. 1. 5. Lazer İle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Literatür Yardımıyla Tayini	70

BÖLÜM IV. SONUÇLAR VE ANALİZLERİ 74

IV. 1. DAİRE, KARE VE ÜÇGEN GEOMETRİLERİNDE KESİLEN DELRİN VE TEFLON MALZEMELERİNİN BOYUT ÖLÇÜLERİ	74
IV. 2. BOYUTLAR İÇİN REGRESYON ANALİZİ	74
IV. 3. KATSAYILARIN ANLAMI VE HESAPLANIŞI	75
IV. 4. ÇOKLU REGRESYON MODELİNİN BELİRLİLİK KATSAYISININ HESAPLANMASI	76
IV. 5. ÇOKLU REGRESYON MODELİNİN GÜVEN ARALIĞININ BULUNMASI VE HİPOTEZ TESTİ HESAPLANMASI	76
IV. 6. ÇOKLU REGRESYON MODELİNDE STANDART HATALARIN HESAPLANIŞI	77
IV. 7. GÜVEN ARALIĞININ VE HİPOTEZ TESTİNİN HESAPLANMASI.....	78
IV. 8. DAİRESEL KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ	79
IV. 9. DAİRESEL KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ	80
IV. 10. KARE KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ	82
IV. 11. KARE KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ.....	83
IV. 12. ÜÇGEN KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ	84
IV. 13. ÜÇGEN KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ ANALİZİ	85

BÖLÜM IV. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME	87
KAYNAKLAR	89
ÖZGEÇMİŞ	1

ÖZET

PLASTİK MALZEMELERİN (PTFE ve POM) LAZER İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Lazerler endüstrinin hemen hemen tüm önemli sektörlerinde kullanılmaktadır. Bu sektörlerin başında, metal endüstrisi, havacılık endüstrisi, otomotiv endüstrisi, bilgisayar endüstrisi, mikro-nano teknolojiler ve tıp endüstrisi gelmektedir.

Konvansiyonel proses metotları ile karşılaştırıldığında teknik ve ekonomik açıdan birçok üstünlükleri olan lazerin endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan üç tipi mevcuttur.

Plastiklerin birçok alanda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte şekillendirme problemleri de ortaya çıkmıştır. Şekillendirme yöntemlerinden birisi de kesme işlemidir. Plastik malzemelerin kesiminde lazer uygulamaları birçok endüstride gittikçe artmaya başladığı gözlemlenmektedir. Yüksek kesme hızında yüksek kaliteye sahip plastik ürünler elde edilebilmektedir.

Plastiklerin lazerle kesilmesi işleminde kesme parametrelerinin seçimi gerçekten önemli bir problemdir. Akademik çalışmaların plastiklerin lazer ile kesme işleminde kesilen bölgedeki malzeme yapısının davranışları ve bu davranışlara göre bazı parametrelerin etkilerini araştırmaya yoğunlaştığı görülmektedir. Uygulamacıların da kesme işleminde kullanabileceği uygun kesme parametrelere ihtiyacı olduğu ve ortak bir çalışmanın yapılması gerektiği kanaati oluşmuştur.

Bu çalışmada, özellikle PTFE ve POM malzemelerin lazerle kesilmesi esnasında kullanılacak kesme parametreleri değerleri literatür araştırılmasında belirlenmeye çalışılmıştır. Tezde, gibi birçok değişkenlere bağlı olan bu değerler için basınç, ilerleme hızı ve güç değişken kabul edilmiş ve her biri için üçer seviye belirlenerek deney tasarımı yapılmıştır. Bu parametrelerin kesilen parçaların boyut ölçüleri üzerine tesirlerini inceleyebilmek için eşit çevre uzunluklarına sahip daire, kare ve üçgen şeklinde kesimler gerçekleştirilmiştir. Kesilen parçaların boyutları ölçülmüş ve deney verilerine göre çok değişkenli regresyon analizi ile en küçük kareler yöntemini kullanarak her bir parçanın boyutunu hesaplayabilen denklemler elde edilmiştir. Varyans analizi yapılarak

parametrelerin boyut üzerine tesirleri büyüklükleri hakkında tahminlerde incelenmiştir. PTFE ve POM malzemelerin lazerle kesilmeleri esnasında uygulamacıların ihtiyaç duyduğu uygun basınç, ilerleme hızı ve güç değerleri belirlenmiştir.

Aralık, 2006

Mahir Kurt

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF LASER CUTTING PROPERTIES OF PLASTICS MATERIALS (PTFE and POM)

Lasers are used in nearly all important sectors of industry. These are mainly metal, aerospace, automotive, computer, micro-nano technologies and medicine. Compared to conventional processing methods, lasers have many technical and economical advantages. There are three types of laser which are widely used in industry.

Introduction of plastics in many areas gave rise to shaping problems. Cutting is one of the shaping methods. Lasers are increasingly used in the cutting of plastics for many industries. High quality plastic products can be obtained in high-speed laser cutting.

Determination of cutting parameters is really an important problem in the cutting of plastics by laser. Academical studies are focused on the behaviour of material structure in the cutting area and investigation of effect of some parameters with respect to these material behaviour.

In this study, laser cutting parameters specially for PTFE and POM are tried to determine in the literature search stage. Depending on many variables, there are three parameters which are pressure, feed rate and power. Three levels were determined for each parameter and experiment design was performed. In order to find out the effect of cutting parameters on the part dimensions cuttings were carried out on the circular, rectangle and triangle contoured parts which have same cutting lengths. Dimensions of parts were measured after cutting. Equations, which are capable of calculating dimensions of each part, were obtained through the multivariable regression analysis and least squares method. The effect of cutting parameters on the dimensions were estimated through the variance analysis. The required pressure, feed rate and power values, which are needed by industry, were determined.

December, 2006

Mahir Kurt

SEMBOL LİSTESİ

- s** : Malzeme kalınlığı (mm)
V_s : İlerleme hızı (mm/dak)
P : Gerekli olan lazer enerjisi (W)
P_t : Isıtma için gerekli enerji (W)
P_m : Ergime için gerekli enerji (W)
ρ : Eriğin yoğunluğu (kg/m³)
c : Spesifik ısı kapasite (J/kg K)
T₀ : Çevre sıcaklığı (°C)
T_p : Proses sıcaklığı (°C)
T_m : Erime sıcaklığı (K)
T_v : Buharlaşma sıcaklığı (°C)
w : Kerf genişliği (mm)
t : Zaman (s)
λ : Dalga boyu (nm)

ŞEKİL LİSTESİ

SAYFA NO

Şekil I. 1. Lazer /Punch birleşimi makine (circa 1978-Courtesy Strippit - LVD).....	2
Şekil I. 2. a)Konvansiyonel Taret Punç b)Lazer Kesim c)Taret Punç ve Lazer Kafası	3
Şekil II. 1. Elektro Manyetik Alan	4
Şekil II. 2. Elektro Manyetik Dalgalar Kullanım Yerleri	7
Şekil II. 3. Elektromanyetik Spektrum.....	8
Şekil II. 4. Lamba İle Lazer Işığı.....	10
Şekil II. 5. Lazer Üreticinin Ana Elemanları	12
Şekil II. 6. Enerji Seviyeleri	13
Şekil II. 7. N ₂ Molekülünün Enerjisinin CO ₂ Molekülüne Transferi	15
Şekil II. 8. CO ₂ Lazerin Uyarılma Prensibi	16
Şekil II. 9. Lazer Tüpü.....	17
Şekil II. 10. a) Hızlı Eksenel Akışlı CO ₂ Lazer Şematik Sekli b) Rofin Sinar In SR Serisi.	18
Şekil II. 11. Rofin Sinar HF Uyarmalı Çapraz Akışlı CO ₂ HF Lazer	19
Şekil II. 12. Çapraz Akışlı CO ₂ Lazerin Şematik Şekli	19
Şekil II. 13. Rofin DC Serisi Yayılma Soğutmalı Yüksek Güçlü CO ₂ Lazer	20
Şekil II. 14. Nd:YAG Lazerin Şematik Sekli	22
Şekil II. 15. 4 Tane Odalı Rofin Sinar 2.8 kW Nd:YAG Lazer	22
Şekil II. 16. a)Tek rodlu diyot lazer şematik sekli b) 4 tane diyot pompalı Nd:YAG lazer Rofin Sinar 1.5 kW diyot lazer.....	23
Şekil II. 17. Rofin Sinar 1.5 kW diyot lazer.....	24
Şekil II. 18. Lazer Işını İle Kesmenin Prensibi	30
Şekil II. 19. Hava Sanayisinde Lazer Kaynağı.....	31
Şekil II. 20. Lazer kaynak makinesi	32
Şekil II. 21. Diyot İle CO ₂ Lazerin Kaplamasının Karşılaştırılması	34
Şekil II. 22. Koaksiyal Toz Püskürtmeli Lazer Kaplama.....	34
Şekil II. 23. Lazer Işını İle Yüzey Kaplama Uygulaması.....	35
Şekil II. 24. Lazer Markalama Makinesi	37
Şekil II. 25. Kumpas Markalama.....	38
Şekil II. 26. Motor Bloğu Markalama	38
Şekil II. 27. Lazer Serleştirme Aletinin CNC Torna Tezgahına Entegresi	39
Şekil II. 28. Hava Sanayinde Kullanılmak Üzere Lazerle Yüzeyleri Sertleştirilmiş Mil.....	39
Şekil II. 29. İşlemesi Zor Olan Seramik Malzemeler (Silisyum Nitrit, Zirconia, Mullit).....	41
Şekil II. 30. Lazer Destekli Torna İşlemleri (LAM) Kurulumu	42
Şekil II. 31. Lazer Temizleme Uygulaması.....	43

Şekil II. 32. Parlatılmış Yüzeyin Sertliği.....	44
Şekil II. 33. Yüzeyden 1 mm Parlatılmış	44
Şekil II. 34. Parlatılmamış Ana Malzeme	44
Şekil II. 35. Boru Bükme Şematik Resmi Ve Örnek Parça.....	46
Şekil II. 36. Lazerle Şekil Verilmiş Sekiler Ve Lazer Sekil Verme Makinesi.....	46
Şekil II. 37. Lazer Güçleri Ve Kesebilecek Malzeme Kalınlıkları.....	48
Şekil II. 38. TEM 00 Şematik Şekli Modu a) 3D Görünüşü b) Yatay Kesiti (% 85 Yüzey) c) Kesit Eğrisi	49
Şekil II. 39. Farklı TEM Modları	49
Şekil II. 40. Şekil Odaklama Çapının Değişimi	51
Şekil II. 41. Sapma Açısı.....	52
Şekil II. 42. 4-kW CO ₂ , CW Lazer Kesme İşlemlerinde İlerleme Ve Malzeme Kalınlığı Arasındaki İlişki.	53
Şekil II. 43. A) 10 mm Yumuşak Çelik İlerleme 300 mm/min, Basınç 1 Bar B) 10 mm Yumuşak İlerleme 300 mm/min, Basınç 3 Bar.....	54
Şekil II. 44. Odaklama Noktası Pozisyonları	55
Şekil II. 45. Lazer Kesim Yüzeylerinin Kalite Kriterleri	59
Şekil II. 46. Çeşitli Kerf Şekilleri.....	60
Şekil II. 47. Malzemenin Kalınlığı ile Yüzey Kalitesi Arasındaki İlişki	61
Şekil II. 48. Aynı Kalınlıktaki Malzemelerin Farklı Odaklama Sonuçları	62
Şekil II. 49. Kesim Çizgileri.....	63
Şekil II. 50. Kesim Yerinin Dikliği	63
Şekil III.1. Deneyde Kullanılan TRUMPF L3030 CNC Lazer Kesme Makinesi	65
Şekil III.2. Kesilen Geometrilere ve Ölçüleri	72
Şekil III.3. Üçgen Şeklindeki Kesimlerin Ölçmelerinde Kullanılan Kenarların Numaralandırılması	72
Şekil III.4. Kare Şeklindeki Kesimlerin Ölçmelerinde Kullanılan Kenarların Numaralandırılması	73
Şekil IV.1. Dairesel Kesim Yapılan Derlin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı	80
Şekil IV.2. Dairesel Kesim Yapılan Derlin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı	81
Şekil IV.3. Kare Kesim Yapılan Derlin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı	82
Şekil IV.4. Kare Kesim Yapılan Teflon Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı	83

TABLO LİSTESİ

SAYFA NO

Tablo II. 1. Gaz lazerler	15
Tablo II. 2. Başlıca Excimer Lazerler	24
Tablo II. 3. Diyot Lazer İle Konvansiyonel Lazerin Karşılaştırılması	25
Tablo II. 4. Lazerler ve Uygulamaları.....	26
Tablo II. 5. Lazer İle Malzeme İşleme Uygulamaları.....	29
Tablo II. 6. Elektrik Tüketimi Açından Karşılaştırma.....	33
Tablo II. 7. Tablo Markalama teknolojilerin karşılaştırılması.....	36
Tablo II. 8. Kaynakta Kullanılan Lazerlerin Karşılaştırılması.....	40
Tablo II. 9. Lazer ile işleme parametreleri.....	47
Tablo II. 10. TRUMPF Standart Kerf Değerleri.....	60
Tablo III. 1. Teflon Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	67
Tablo III. 2. Delrin (POM) Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	69
Tablo III. 3. L9 (34) Deney Tasarım Tablosu	71
Tablo III. 4. Kesme İşleminde Kullanılan Parametreler ve Seviyeleri.....	71
Tablo IV. 1. Ölçme Neticeleri	74

BÖLÜM I

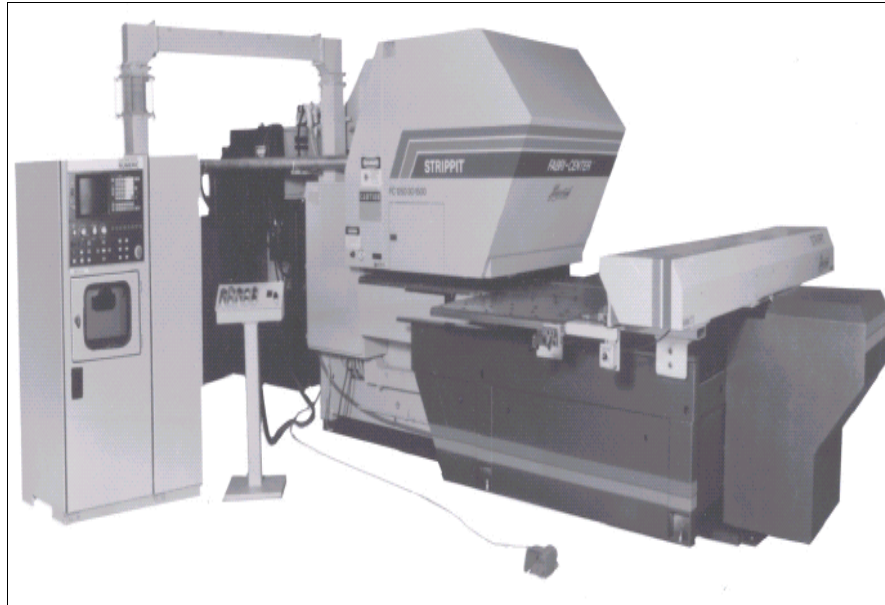
I. GİRİŞ

Lazer ile ilgili ilk bilgiler 1917 yılında Albert Einstein'ın *Physikolische Zeit*'teki "Zur Quanten Theorie der Strahleng" adlı makalesinde yayınlanmıştır. Einstein, radyasyon ve madde arasındaki etkileşimi açıklamak için "etkilenmiş emisyon" ve "popülasyon ters çevirme" olaylarını açıklamıştır [1]. Teoriye göre lazerin ortaya çıkması; ışığın spontan veya stimüle edilmiş emisyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Ancak Einstein'ın bu teorisini gerçekleştirebilmesi için, atom ve maddenin yapısıyla malzeme bilimi'nde ileri düzeyde bilgi ve teknolojik imkânlar ihtiyacı vardı. Bu yüzden Lazer ışığının üretilmesi 1960 yıllara kadar mümkün olamamıştır.

Işıma ve madde etkileşmesi ile ilgili Einstein'ın teorisinin gerçekleştirilmesi çalışmaları, 1950 yılında başlamıştır. 1954 yılında Townes ile Gordon ilk mikro dalga lazeri bulmuşlar ve bunu "Maser" (Microwave Amplification by Stimulation Emission of Radiation) olarak adlandırmışlardır. 1958 yılında Townes ile Schowlow Bell laboratuvarında çalışarak "Laser" olarak adlandırılan görülebilir maser ışığının ilk teorik hesaplarını yapmış ve yayınlamışlardır [2].

Lazerin ilk yapımı 16 Mayıs 1960 yılında Theodore Maiman tarafından gerçekleştirildi. Rubin (Ruby) kristalini aktif madde olarak kullanmış ve California'daki Hughes Research Laboratories'de yapmıştır. Lazer : kırmızı renkte, tek dalga boyunda (694 nanometre , $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ metre}$) ve gözle görülebilir özelliktedir. Bir yıl gibi kısa sürede Ticari Lazerler kullanılmaya başlanmıştır. Aynı zamanda Lazerin güvenirliliği ve canlı doku üzerindeki etkisi araştırılmış ve çalışmalar yayınlanmıştır [3].

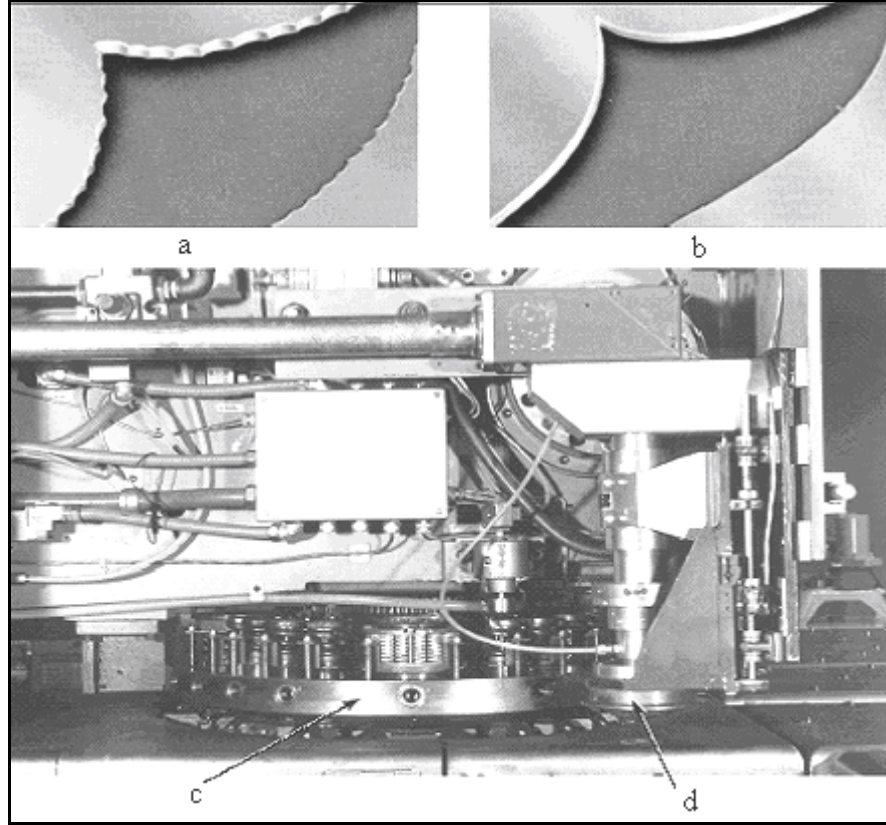
Rubin Lazeri'nin bulunmasından sonra Lazer çok hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. 1960 yılında ilk Lazer'in geliştirilmesinden bu yana lazer teknolojisinde çok büyük gelişmeler olmuştur. Lazer teknolojisinin önemli derecede gelişmesi, lazer ışığına özgü bazı özelliklerin kullanıldığı geniş bir alanda, bilimsel ve teknolojik uygulamaları hızlandırdı. Bu özellikler Lazer ışığının üretilmesinde kullanılan yöntemin, normal ışığın üretilmesinde kullanılan yöntemden farklı olmasından dolayı meydana gelmektedir. Son yıllarda yapılan Lazer sisteminde, Lazer malzemesi olarak çok çeşitli gazlar, katılar veya sıvılar kullanılmaktadır. Bu sistemler ya sürekli veya darbeli, tek renkli demetler biçimde ışık ve optik spektrumunun geniş bir bölgesinde (mor ötesi, görünür ve kızıl ötesi) mikrowattlardan megawatlara kadar değişen çıkış güçlerinde çalışabilecek şekilde planlanabilir. Bir Lazer sistemi bu özelliklerin hepsine birden sahip değildir. Sistemin seçimi: dalga boyu, güç mertebesi ve uygun diğer değişkenlerin kullanılacağı özel uygulamanın şartlarına göre yapılır. Birçok uygulamada; önemli olan değiştirilebilir güçlerde, lazer enerji çıkışı ve lazer sistemine elektrik girişinin kontrol edilmesidir. 1960 yılında Ali Javan, William Bennett ve Donald Herriott (The Bell Telephone Lab) bir gaz lazere olan Helyum - Neon (He-Ne) Lazeri'ni yaptılar. Bunu takip eden yıllarda sırasıyla yarı-iletken, kimyasal, CO₂ ve dye Lazer'ler teknik olarak gerçekleştirildi [4].



Şekil 1.1. Lazer /Punch Birleşimi Makine (Circa 1978). (Courtesy Strippit - LVD)

Ticari Lazer Kesme Makinesi ilk olarak Strippit tarafından 1978 yılında New York'ta yapılmıştır. Bileşenleri olarak, taret punç ve lazer kesme kafası aynı makine

üzerindedir [4,6]. Nümerik kontrol ünitesi, iş parçası hareket sistemi ve optik bölümlerinden oluşur. Bu makinede ; ışığın hareketi sabit olup iş parçası X ve Y yönlerinde hareket ettirilmektedir. Şekil 1-2 (b) 'de Lazer kesiminin esnek ve kesme yüzeyinin temiz olduğu gözlenmiştir. Şekil 1-2 (a) ' da ise yüzeylerin pürüzlülüğü gözle görülebilir şekildedir ve Taret punç ile kesilen yüzeyler esnek olmamaktadır. Ayrıca Lazer ve punç aynı kafada olduğu için makine çok daha karmaşık bir hale gelmiştir[3,4].



Şekil 1.2. (a) Konvansiyon El Taret Punç (b) Lazer Kesim (c) Taret Punç ve Lazer Kafası

En belirleyici dezavantajı ; konvansiyon el makine işlemlerine göre daha yavaş kesim yapmasıdır. Endüstride kullanılan bu Lazer ; 1 kW gücünde olup, 3,3 m² 'lik bir alanı kaplamaktadır. Bu alanda Lazer Kontrol Ünitesi ve Lazer Güç Sağlayıcı bulunmaktadır. Son zamanlarda kullanılan Lazer Kesme Makineleri daha güçlü, verimliği çok yüksek ve çevreye karşı çok daha güvenlidir[4, 6].

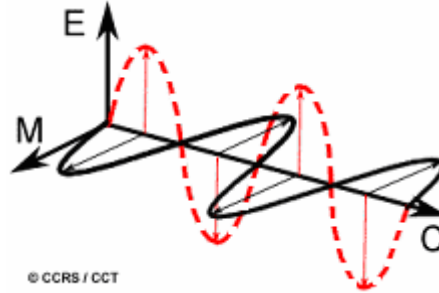
BÖLÜM II

LAZER IŞINI VE ENDÜSTRİYEL ALANDA KULLANIMI

II. 1. IŞIK

Işık: Uzayda elektromagnetik dalgalar halinde yayılan bir enerjidir. Işık; zayıflar, kırılır, yansır dağılır. Enerji olduğuna göre bir iş yapabilir ve başka enerjilere dönüşebilir [7].

Şekil II.1 'de görüldüğü gibi ışığın periyodik olarak bir elektrik alanı ve buna dik olan magnetik alanı vardır. Elektromagnetik dalganın yayınlanması için hava gibi bir materyalin aracılığına gerek yoktur. Bu dalga vakumlu havada daha hızlı yayılır. Elektromagnetik dalga spektrumunda görülen ışık, çok küçük bir alanı oluşturur. Fizikte görülen bu ışığa komşu alanlarda; uzun dalga boylu infrared ve kısa dalga boylu ultraviyole (UV) ışık denir.



Şekil II.1 Elektro Manyetik Alan

Elektromagnetik alan içindeki dalga C (X) yönünde ilerlemektedir. Elektrik alanı daima E (Y) eksenine paraleldir, E (Y) yönünde kutuplanır ve CE (XY) düzleminde (salınım düzlemi) titreşim yapar. Benzer şekilde magnetik alan daima M (Z) eksenine paraleldir, M (Z) yönünde kutuplanır ve CM (XZ) düzleminde salınır. Şekil II.1'de fiziksel anlamda aralık, kırılma, sapma gibi diğer dalgaların özelliklerini taşır ve her dalganın protonuna bağlı olarak ayrı bir karakter gösterir[9].

II.2. ELEKTROMANYETİK DALGALAR

Elektromanyetik dalgalar geniş bir frekans veya dalga boyu aralığını kapsayıp kaynaklarına göre sınıflandırılabilirler. Şekil II.3'de elektromagnetik spektrum adı verilen bu sınıflandırma kesin sınırlar sergilemez. Çünkü dalga kaynakları, çakışan frekans aralıklarında dalgalar üretebilir [9,10,11,12].

Bütün elektromanyetik dalgalar, boşlukta ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) hızı ile yayılır ve f frekansı, λ dalga boyu ile aralarında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır;

$$\lambda = c/f$$

Elektromagnetik dalgaların, frekans ve dalga boylarını tanıyalım:

II. 2. 1. Radyo Dalgaları

Birkaç km'den 0,3 m'ye kadar dalgaboyları ve birkaç Hz'den 10^9 Hz'e kadar frekanslara sahiptirler. Şekil II.2 ' de TV ve radyo yayın sistemlerinde kullanılan bu dalgalar, titreşim devrelerinin bulunduğu elektronik aygıtlar tarafından üretilirler [8,9,10,11].

II. 2. 2. Mikrodalgalar

Bu dalgalar, 0,3 m'den 10^{-3} m'ye kadar dalgaboyları ve 10^9 Hz'den $3 \cdot 10^{11}$ Hz'e kadar frekanslara sahiptirler. Şekil II.2'de görülen bu dalgalar; atomik ve moleküler yapının çözülmesinde olduğu kadar, radarlar ve diğer iletişim sistemlerinde de kullanılırlar. Bu dalgalar da elektronik aygıtlar tarafından üretilir. Mikrodalga bölgesine UHF (ultra high frequency) adı verilir [8,9,10,11].

II. 2. 3. Kızılötesi Dalgalar

Kızılötesi dalgalar 10^{-3} m'den $7,8 \cdot 10^{-7}$ m'ye kadar olan dalga boylarına ve $3 \cdot 10^{11}$ Hz'den $4 \cdot 10^{14}$ Hz'e kadar frekanslara sahiptirler. Bu bölge: 10^{-3} m'den $3 \cdot 10^{-5}$ m'ye (uzak kızılötesi), $3 \cdot 10^{-5}$ m'den $3 \cdot 10^{-6}$ m'ye (orta kızılötesi), $3 \cdot 10^{-6}$ m'den $7,8 \cdot 10^{-7}$ m'ye (yakın kızılötesi) kadar olanlar olmak üzere üçe ayrılır. Bu dalgalar, moleküller ve sıcak cisimler tarafından üretilir. Endüstri, tıp, astronomi v.b. alanlarda oldukça fazla

kullanılmaktadır. Şekil II.3.'de bu dalgaların hangi dalga boyları arasında olduğu gösterilmiştir [8,9,10,11].

II. 2. 4. Görünür Işık Dalgaları

Şekil II.2 ' deki görünür ışık dalgaları, gözün retinasının duyarlı olduğu dalga boylarıyla sınırlanan dar aralıkta bulunurlar. Bu dalgalar, $7,8 \cdot 10^{-7}$ m'den $3,8 \cdot 10^{-7}$ 'ye kadar dalga boylarına ve $4 \cdot 10^{14}$ Hz'den $8 \cdot 10^{14}$ Hz'e kadar frekanslara sahiptirler. Işık; elektronların, atom ve moleküller içinde hareket etmesi sonucu üretilir. Aynı zamanda fiziğin optik adı verilen bir dalının konusunu oluşturur. Optik, görüntü oluşumunun yanında optik sistem tasarımlarıyla ilgilenir. Işığın gözde oluşturduğu renk adı verilen çeşitli duyular, elektromagnetik dalganın frekans ve dalga boyuna bağlıdır [8,9,10,11].

II. 2. 5. Morötesi Dalgalar

Morötesi Dalgalar, $3,8 \cdot 10^{-7}$ m'den $6 \cdot 10^{-10}$ m'ye kadar dalgaboylarına ve $8 \cdot 10^{14}$ Hz'den $3 \cdot 10^{17}$ Hz'e kadar frekanslara sahiptir. Bu dalgalar, elektrik deşarjında atomlar ve moleküller tarafından üretilir. Güneş; oldukça güçlü morötesi kaynağıdır. Güneşin morötesi ışınları, atmosferin üst katmanlarındaki atomlarla etkileşir ve çok sayıda iyon üretir. Bu nedenle yaklaşık 80 km'den daha yüksek iyonize haldeki katmana iyonosfer denir. Şekil II.2 ' de gösterilmiştir.

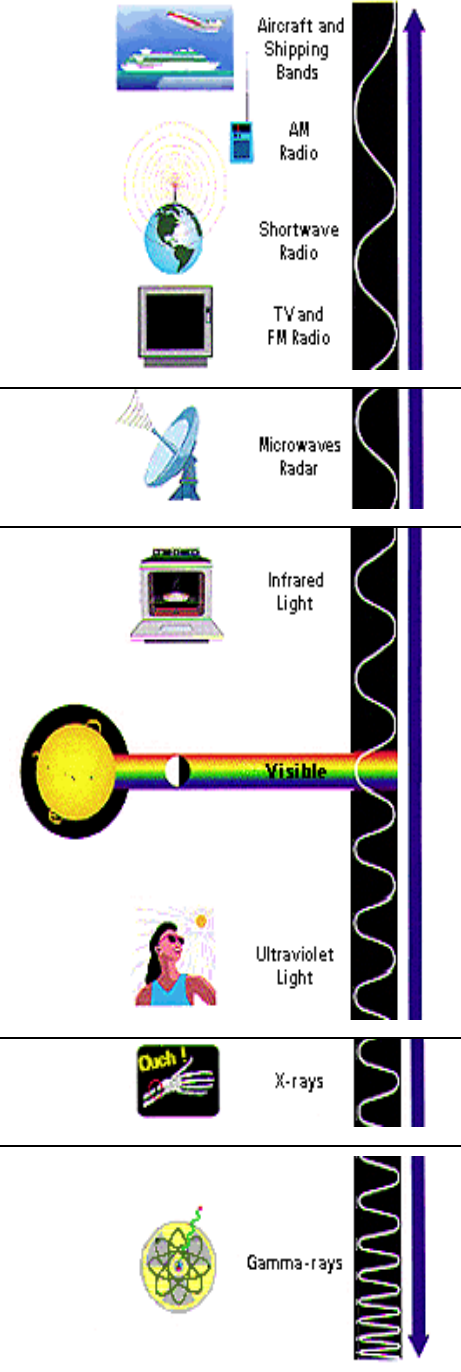
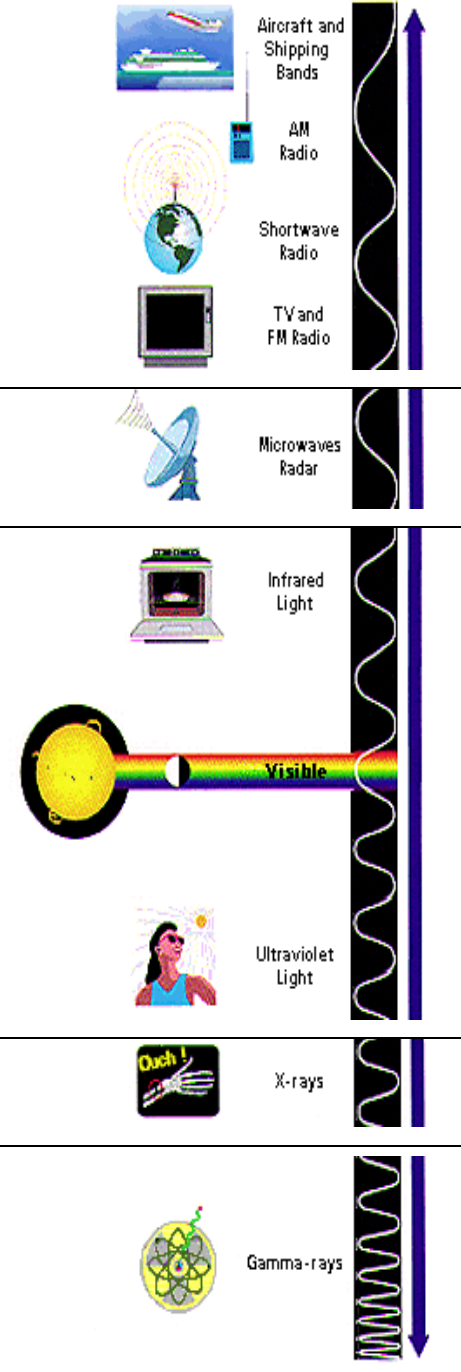
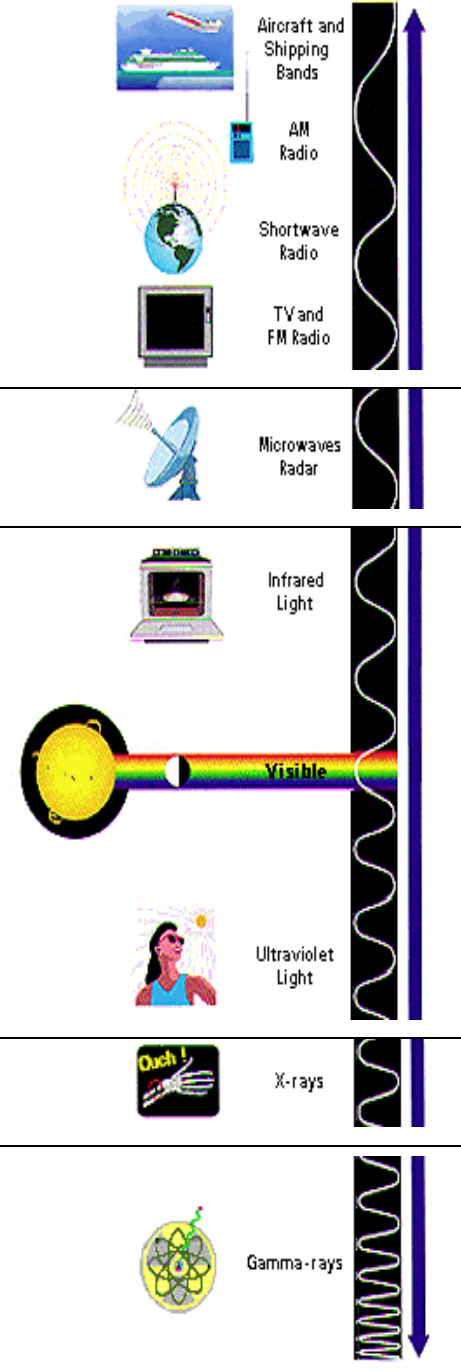
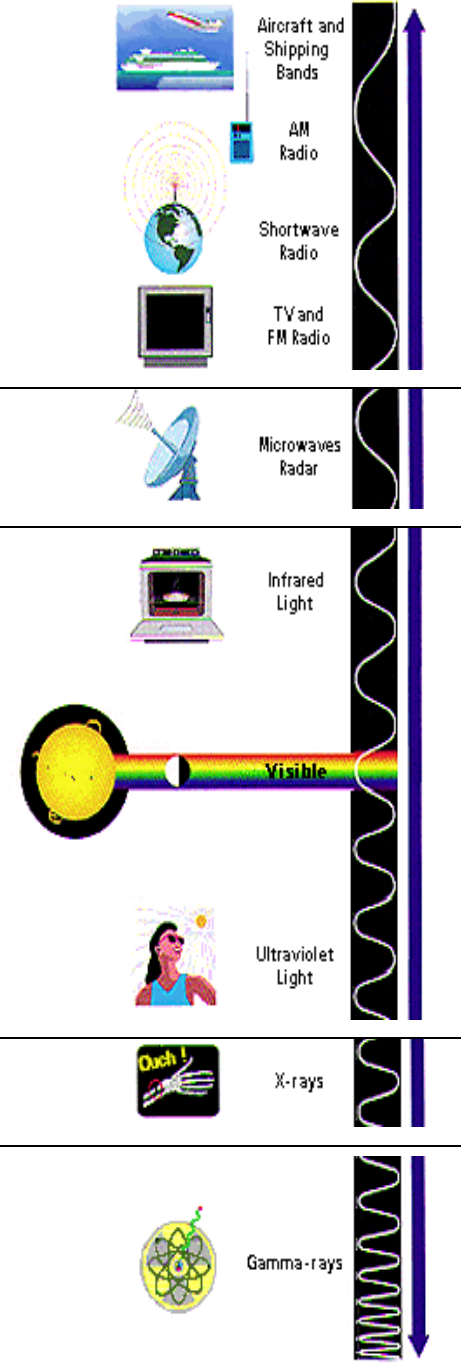
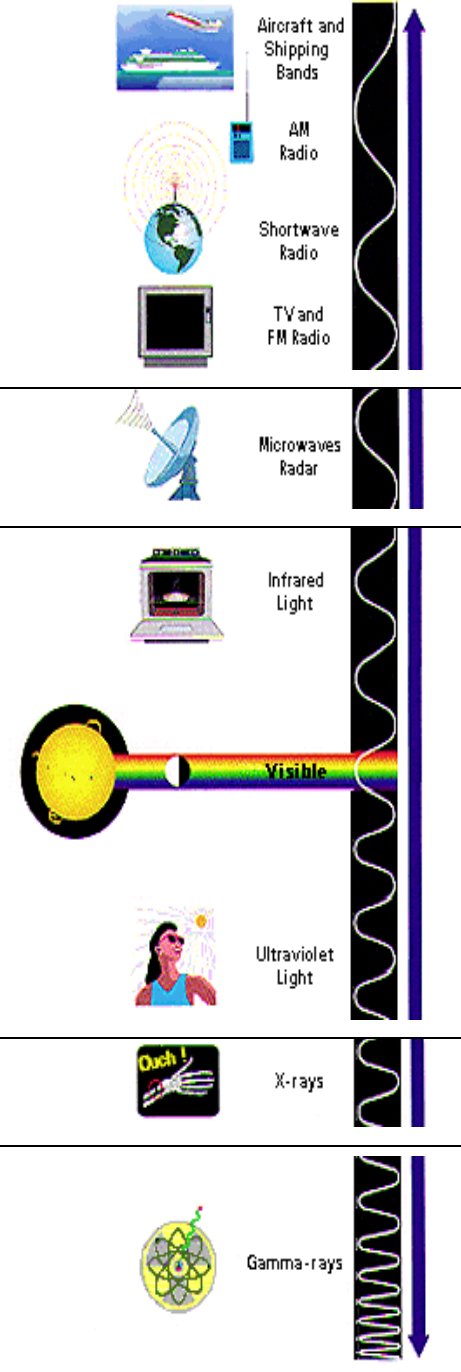
Mikro organizmalar, morötesi ışınları soğurduklarında parçalanırlar. Bu nedenle morötesi ışınlar tıpta sterilizasyon işleminde kullanılır [8,9,10,11].

II. 2. 6. X–Işınları

X–Işınları: 10^{-9} m'den $6 \cdot 10^{-12}$ m'ye kadar dalgaboylarına ve $3 \cdot 10^{17}$ Hz'den $5 \cdot 10^{19}$ Hz'e kadar frekanslara sahiptir. Elektromagnetik spektrumun bu bölgesi: 1895'te W. Roentgen tarafından, katot ışınlarının incelenmesiyle keşfedildi. Bir metal hedefin, bombardımana tabi tutulan yüksek enerjili elektronları frenlenmesi sonucu x ışınları oluşur. X-ışınları tıpta bir tanı aracı olup, kanser tedavisinde kullanılır. Şekil II.2 Canlı dokulara zarar verdiğiinden, X-ışınlarına gereksiz yere hedef olmamak gerekir. Ayrıca X-ışınları kristal yapı incelemelerinde kullanılır. Çünkü X-ışınlarının dalga boyları kristal yapıdaki atomlar arası uzaklık ($=1 \text{ \AA}$) boyutundadır [8,9,10,11].

II. 2. 7. Gamma Işınları

Gamma Işınları, Radyoaktif çekirdekler tarafından nükleer tepkimelerde yayılırlar. 10^{-10} m'den 10^{-14} m'ye kadar dalgaboylarına ve 3.10^{18} Hz'den 3.10^{22} Hz'e kadar frekanslara sahiptirler. Bu ışınlar çok girici olduklarından, canlı dokular tarafından soğurulunca zarar verirler. Şekil II.2 'deki bu ışınlarla çalışanlar, kurşun tabaka gibi soğurucularla korunmalıdırlar [8,9,10,11].

 <p>Aircraft and Shipping Bands AM Radio Shortwave Radio TV and FM Radio Microwaves Radar Infrared Light Visible Ultraviolet Light X-rays Gamma-rays</p>	<p>Bu yöne doğru dalga boylarının</p> <ul style="list-style-type: none">• Dalga boyları artmaktadır.• Kısa frekans'ta olmaktadır.• Düşük Enerjiye sahiptirler <p>Uçaklar ve Gemiler için haberleşme dalgaları AM Radyo dalgaları Kısa Radyo dalgaları TV ve FM Radyo dalgaları</p>
 <p>Mikro dalgalar ve Radarlar</p>	<p>Mikro dalgalar ve Radarlar</p>
 <p>Kızılötesi dalgalar</p> <p>Görülebilir dalgalar</p> <p>Morötesi dalgalar</p>	<p>Kızılötesi dalgalar</p> <p>Görülebilir dalgalar</p> <p>Morötesi dalgalar</p>
 <p>X- Ray ışınlar</p>	<p>X- Ray ışınlar</p>
 <p>Gama ışınları</p> <p>Bu yöne doğru dalga boylarının</p> <ul style="list-style-type: none">• Dalga boyları kısalmaktadır.• Yüksek frekans'ta olmaktadır.• Yüksek enerjiye sahiptirler.	<p>Gama ışınları</p> <p>Bu yöne doğru dalga boylarının</p> <ul style="list-style-type: none">• Dalga boyları kısalmaktadır.• Yüksek frekans'ta olmaktadır.• Yüksek enerjiye sahiptirler.

Şekil II.2 Elektromanyetik Dalgalar Kullanım Yerleri .

Dalga Boyları nm	Elektromanyetik Işıklar	Lazer Çeşitleri
10 ⁻² 10 ⁻¹ 1 10	Gama Işıkları	
10 ²	UV	KrF Excimer (248 nm) HeCd (325)
10 ³	Görülebilir Işıklar	Ar ion (515 nm) HeNe (633 nm) Ruby (694 nm)
10 ⁴ 10 ⁵	IR	GaAs (845 nm) Nd:YAG (1064 nm) CO ₂ (10,600 nm)
10 ⁶ 10 ⁷ 10 ⁸	Mikro Dalgalar Radyo Dalgaları	Mazer

Şekil II. 3 Elektromanyetik Spektrum

Lazerler mikrodalga ışınları ile gama ışınları arasındaki dalga boylarında bulunmaktadır. Şekil II.3 Lazerler gözle görülen ve gözle görülmeyen çeşitleri vardır.

II. 3. LAZER

Lazer (LASER) terimi İngilizce'deki " Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" kelimelerinin baş harflerinin birleşmesinden oluşur. Lazer ışığın şiddetini uyarılmış ışımaya yoluyla yükseltilmesidir.

Beyaz ışık çok renkten (dalga boyundan) oluşan polikromatik bir ışık demetidir. Lazer eş fazlı (coherent) yayılım yapar. Birden fazla dalga boyu içeren güneş ışığı veya bir lambadan yayılan ışık ise eş fazlı olmayan (incoherent) yayılım yapar ve yayıldığı mesafeye göre şiddetini kaybeder. Eğer bir rengi diğerlerinden ayırıp kullanmaya kalkarsak buda mono kromatik bir ışık olur ve polikromatik ile aynı özellikleri taşıdığından eş fazlı olmayan "incoherent" ışık kaynakları olarak adlandırılırlar. Çeşitli veya tek kaynak boyundan oluşan, her yöne yayılma ve dağılma özelliği gösteren ışıklara eş fazlı (coherent) ışıklar denir. Lazerler; kızıl ötesinden başlayıp (IR) mor ötesine (UV) kadar uzanan, ışık şiddeti artırılmış, eş fazlı ışınımlardan oluşan ışın demetleridir. Şekil II.3'de eş fazlı ışınım, Lazer'in aşırı yoğunluğu ve uzun mesafede çok az sapması olan saf bir renkte (frekansta) olması anlamındadır. Lazer sistemleri; içerisinde depolanan ışın demetlerini, eş fazlı olarak daha güçlü bir saf ışınım olarak yayma özelliğine sahiptirler [5,7].

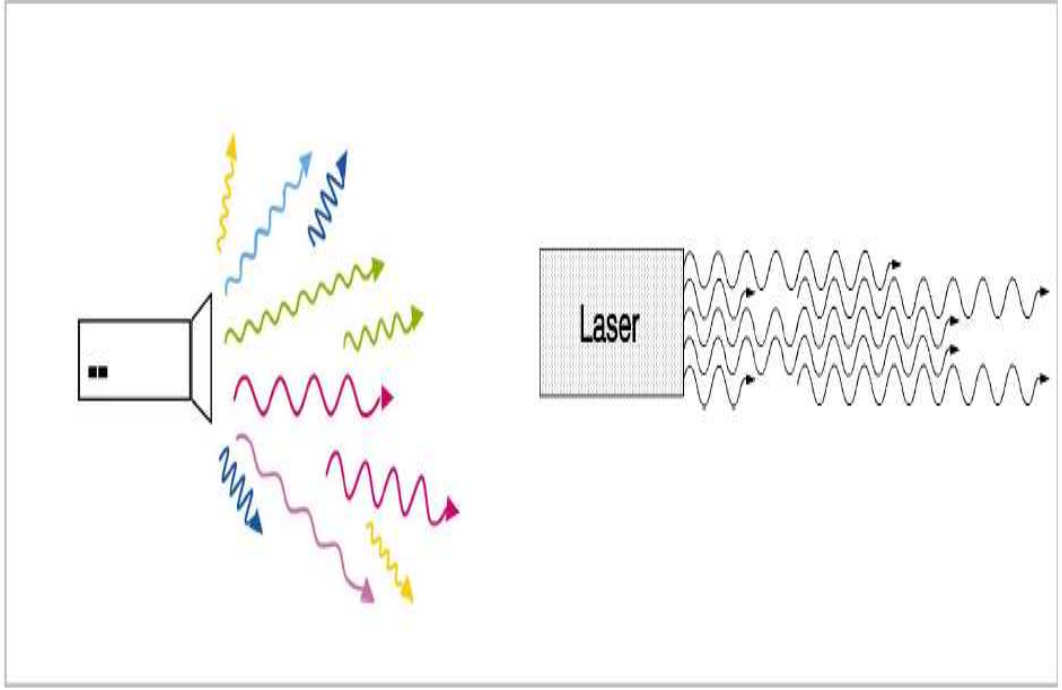
II. 3. 1. Lazer Işığının Özellikleri

Lazer ışığı, çıkış gücüne ve dalga boyuna bağlı olarak farklı özellikler ve biçimlerde bulunur [17].

Lazerler ışığının birçoğu tek renklidir. Fakat bazı Lazerler; farklı ortam şartlarında ve farklı dalga boyunda lazer ışığı ortaya çıkarmaktadır. Örneğin; Helyum Neon lazer ışını en çok bilinen, 632.8 nm dalga boyunda ve kırmızı renkte ışın ortaya çıkartır. Ayrıca farklı gaz karışımları ve farklı mercekler kullanıldığı zaman 543 nm dalga boyunda ve yeşil renkte ışın ortaya çıkartır [5].

Bazı lazerler aynı anda iki veya daha fazla dalga boylarında ışın yayarlar. Fakat bunların dalga boyları birbirine yakındır. Örneğin Argon; Lazerler 450 ile 530 nm dalgaboyu arasında ışın yayarlar [5].

Lazer ışığı eş fazlıdır (coherent). Bütün dalgalar birbiriyle tam uyumludur. Sadece bir Lazer huzmesine bir çift yarık koyarak değil, iki farklı Lazerden huzmeler kullanılarak da elde edilebilir.



Şekil II.4 Lamba İle Lazer Işığı

Şekil II.4’de görüldüğü gibi soldaki bir lambanın yaydığı , eş fazlı olmayan ve farklı renklerdeki ışıklardır. Sağdaki Lazer ise tek renkli, oldukça düz, yoğun, aynı fazlı paralel dalgalar halinde ve yüksek güçteki ışıklardır [16].

En büyük özelliği; dağılmaz olması ve yön verilebilmesidir. Bu özelliğinden istifade edilerek 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’in çok parlak olmasını sağlar. Lazer ışını, dalga boyu tek olmasından monokromatik özellik taşır. Frekans dağılım aralığı, frekansının bir milyonda biri civarındadır. Bu sebepten dolayı istenilen frekansta çok sayıda dalgalar, lazer dalgası üzerine bindirilmek suretiyle haberleşmede iyi bir sinyal jeneratörü olarak iş görür [15].

Aynı anda çok bilgi bir yerden başka bir yere gönderebilir. Lazer ışını dağılmaz olduğundan, kısa darbeler halinde yayınlanabilmesi mümkündür. Bu özelliğiyle kayıpsız yüksek enerji nakli yapılması sağlanabilir. Lazer kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde; kesme, kaynak ve delme endüstrisinde kullanılır. Ayrıca lazer darbesinin çok kısa olmasından dolayı yüksek hız fotoğrafçılığında faydalanılır. Yönlü bir hareket olmasından ise holografi ve ölçüm biliminde yararlanır. Bütün özellikleriyle uzak mesafe ölçümlerini gerçekleştirebilir.

Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür [14].

Işık hemen hemen tek renklidir.

Bir lazer huzmesinde ıraksama hemen hemen hiç yoktur. Başka herhangi bir yolla oluşturulan ışık huzmesi ise çok yayılır. Lazer ışığı diğer ışık kaynaklarından daha şiddetlidir [13].

Lazer dalgalarının tümü aynı frekansa sahip (tek renkli) ve birbiriyle aynı fazda (uyumlu) olan ışık demeti oluşturur. Lazer ışık demeti iyi toplanabildiği için uzun mesafelere aktarılabilir [12].

Lazerlerin en dikkat çeken özelliği yönlendirilmesidir. Yarı İletken Lazerler'in haricindekiler, radyasyonu oldukça yönlü ve düşük dağılma açısı ile ayarlı olarak verdikleri için lazer demeti tarafından enerjinin toplanması, küçük bir alana odaklanabilmesi mümkündür. Diğer ışık kaynakları için radyasyon çok geniş açı ile yayılır. Işığın optik sistem kullanmadan toplanması mümkün değildir. Fakat Lazerler için demet dağılma açısı o kadar küçüktür ki, lazer demetinin çok uzun mesafede dahi odaklanması mümkündür [15].

Lazer ışığı: Işık şiddeti artırılmış eş fazlı ışınımlardan oluşan ışık demetidir. Lazer'de uyaran dalga ile uyarılan dalganın aynı fazda olduğu anlaşılmaktadır. Elektrik alanının demet kesit yüzeyinin her noktası için eşit zamanda değişme gözlenecektir. Lazer ışık dalgaları hem uzaysal hemde zamansal uyuma sahiptir. Uyum lazer demetinin bölünerek kullanıldığı alanlarda önemlidir. Farklı mesafelerde yol alacak şekilde ışığın bölündüğü hologram uygulamalarında kullanılır. Düzgün olmayan yüzeyden yansıyan lazer ışığına dikkatli bir şekilde bakıldığında, tanelere ayrıldığı görülür. Bozuk yüzey kesimlerinde yansıyan ışığın uyumunun (fazının) bozulmasından dolayı, rasgele girişim deseninin oluşmasının sonucudur. Bu rasgele girişimler bazı bölgelerde olumlu, bazı bölgelerde olumsuz etki yapabilir. Buda Lazer Işığı'nın uyumundan kaynaklanır [17].

Lazer Işını diğer ışık kaynaklarına göre daha fazla parlaklığa sahiptir. Parlaklığı: Birim açı ve birim alan başına yayımlanan güç olarak tanımlayabiliriz. Lazerler doğrultulmuş demetlerde yüksek güçler üretebildiklerinden oldukça parlak ışık kaynaklarıdır [14].

II. 3. 2. Lazerin Çalışma Prensibi

Optik bakımından saydam, bir ucu tam yansıtıcı ayna, diğer ucunda yarı yansıtıcı iki ayna bulunan bir tüp alınır. Şekil II.5 ' te buna gaz,sıvı veya katı maddelerden birisi konur. Dışarıdan ışık vermek, elektrik akımı geçirmek veya kimyasal yolla elde edilen enerji ortamdaki atomlara ulaşır. Bunların bazıları bu enerjiyi emerler. Fazla enerji atomları kararsız hale getirir. Kendisine bir foton çarpan uyarılmış ve kararsız atom, fazla enerjiyi foton olarak açığa çıkarır. Fotonlar, benzer şekilde diğer fotonların neşrini sağlar. Uçlara ulaşan fotonlar , aynalardan yansıtılarak geriye dönerler ve olay devam eder. Kuvvetlenen ışık yarı yansıtıcı aynadan dışarı çıkar. Bu lazer ışımıdır [5].

Lazer ışınını; uygun adım ile giden aynı üniforma ve şekle sahip askerlere, normal ışığı ise rasgele karakteri bozuk bir orduya benzetmişlerdir.

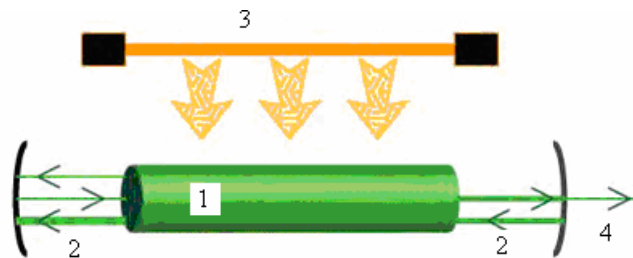
Normal ışıkta dalgalar, birbirini zayıflatıcı karakterde olmasına rağmen, lazerde birbirini kuvvetlendirici karakterdedirler.

Lazer ışınları yüksek frekansa sahip olduklarından, güneş ışını özelliklerine sahiptir. Ancak lazer tek frekansa sahip olduğundan kayıpları azdır.

Lazer ışınları aynı fazda ışık dalgaları olduğu için şiddeti büyük olur. Bu yüzden lazer ışınlarının şiddeti ,güneş ışınlarının şiddetinin bir milyon katıdır.

3) Uyarıcı Kaynak

- Katı lazerler için ışık
- Sıvı lazerler için lazer
- Gaz lazerler için yüksek voltaj



2) Yansıtıcı ayna

1) Uyarılan Madde

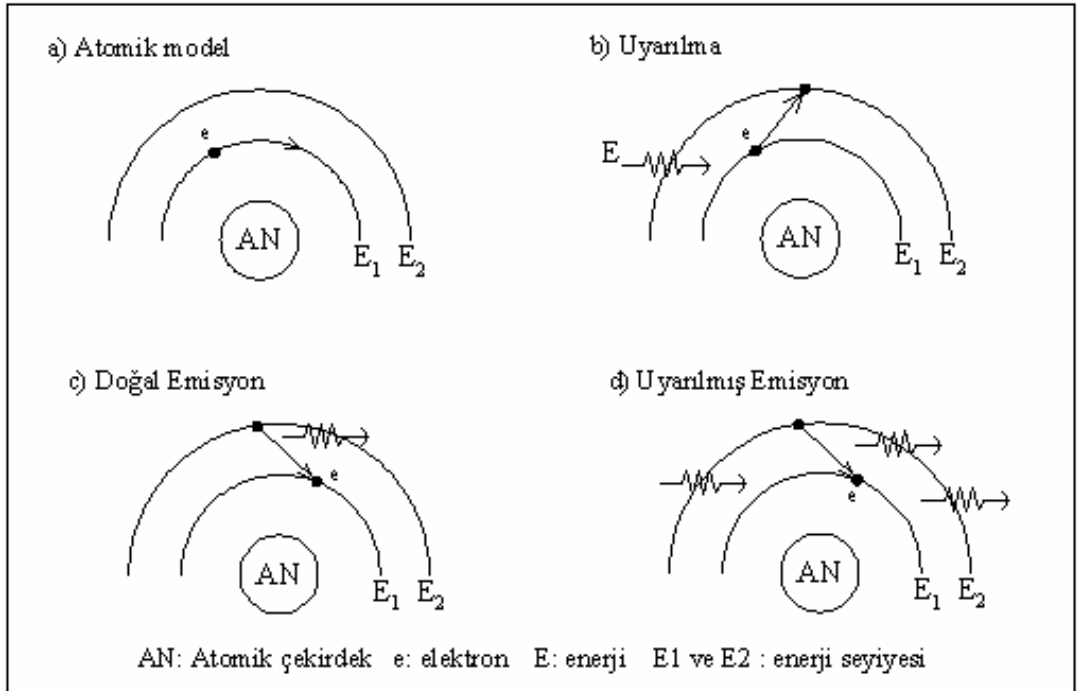
2) Yarı yansıtıcı ayna

- Katı
- Sıvı
- Gaz

4) Lazer üreticinden çıkan ışık

Şekil II.5 Lazer Üreticinin Ana Elemanları

Elektromagnetik dalga paketçığı de denilen foton, güneş ışığı füzyon reaksiyonu sonucu meydana gelir. Bu şekilde yayılan enerji foton enerjisidir. Lazer ışını foton yayılmasından ibarettir. Lazerde foton üretimini anlayabilmek için atomların değişik seviyelerinde ne gibi olaylar olduğunu bilmek gerekir. Bir atomun uyarılmış durumda bulunduğu kısa zaman aralığında, üzerine belli bir dalga boyunda foton düşürülürse, atom aynı fazda foton yayar. Bu işlem peş peşe tekrarlanırsa, tamamen aynı fazda bir ışın demeti elde edilir. En düşük enerji seviyesinde bulunan bir atoma dışarıdan bir foton verilirse, atom enerjisi kazanarak E_1 enerji seviyesinden E_2 enerji seviyesine uyarılmış olur. Bu atom kendi halinde bırakılırsa, uyarılmış bulunduğu E_2 enerjisinden bir foton vererek tekrar E_1 enerji seviyesine döner. Uyarılarak enerji seviyesi E_1 'den E_2 'ye yükseltile atom enerjisini geriye foton olarak yaymaya başlarken bir foton daha çarpıtılırsa, atomu birbiri ile aynı özellikte iki foton terk eder. Bu şekilde atom kat kat enerji seviyelerine çıkarılırsa, bu seviyelerden düşerken de katlar halinde foton ürer. Bu işlem iki paralel ayna arasında aynı fazda olan fotonların toplanması şeklinde devam eder [5].



Şekil II.6 Enerji seviyeleri

Lazer ışını dalgasının dalga boyu, aynalar arasındaki mesafe ile uyumludur. Aynı frekansta yani aynı dalga boyunda yapılan foton üretimine, uyarılmış yayılma işlemi denir. Milyonlarca atom için bu işlem yapılırsa aynı yöne doğru milyonlarca foton paralel ışınlar halinde bir noktadan yayılır. Bu ışınlar aynı fazda, aynı frekansta, aynı yönde olduklarından adeta birbirine yapışıktırlar. Paralel aynalar arasında şiddeti bu şekilde çığ gibi artan ışınlar, ışık frekansına eş bir frekansta, darbeler halinde oldukça parlak ışık huzmesi olarak yayılır. Lazer ışınındaki enerjisinin büyümesi esası işte bu milyonlarca küçük enerji kaynaklarının çok dar bir huzme halinde aynı yönde hem yan yana hem de ardarda birleşmesi neticesidir. Lazerin çalışması için enerji seviyesi düşen atomlarda, daha fazla sayıdaki atomların uyarılacak enerji seviyelerine yükseltilmesi gerekir. Bu durum ise normal olarak atomların enerji seviyesi dağılımının tersidir. Bu sebepten Lazeri'n çalışması için gerekli durum, tersine çevrilmiş dağılım olarak isimlendirilir. Tersine çevrilmiş dağılımı ortaya çıkarmak için pompalama işlemi kullanılır. Optik pompalama ise yüksek frekanslı yoğun ışınların neşriyle yapılabilir [17].

Yarı İletkenli Lazerler'de pompalama elektrik akımı ile gerçekleştirilir ve işlem, elektriksel pompalama olarak isimlendirilir. Gaz Lazerleri'nde ise pompalama işlemi elektron-atom veya atom-atom çarpıştırılmasıyla ortaya çıkarılır ve çarpışma pompalaması olarak bilinir. Kimyasal pompalama işleminde ise Kimyasal Lazerler'de kimyasal reaksiyonlarla atom ve moleküller uyarılır. Gaz-Dinamik Lazerler'de de pompalama ses hızı üstü gaz genişlemesi yoluyla gerçekleştirilir ve gaz genişleme pompalaması olarak isimlendirilir [5].

II. 4. LAZERİN ÇEŞİTLERİ

Endüstriyel alanda kullanılan lazerler; gaz ve katı hal lazerleri olmak üzere iki tiptedir [5].

Gaz lazerlerinden, endüstride en yaygın biçimde kullanılan Karbondioksit Lazer'dir. Kesme ve kaynak işlerinde en çok kullanılan Lazer türüdür.

Diğer Gaz Lazeri ise endüstride nadiren kullanılan Excimer Lazer'dir. Bu lazerin farklı çeşitleri bulunmaktadır. Bundan dolayı farklı dalga boylarında olmaktadır.

Endüstride kullanılan katı hal lazeri ise Nd: YAG Lazeri'dir.

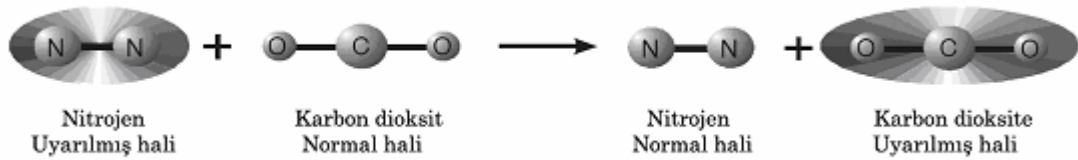
Tablo II.1 Gaz lazerler

Gaz Lazerler	Dalga Boyları (nm)
CO ₂ Lazer	10.6 mikron (9.4 mikron)
HeNe Lazer	632.8nm
Argon Ion Lazerler	514.5 & 488 & 363.8 & 351.1nm
Excimer Lazerler	
• F ₂	157nm
• ArCl	175nm
• ArF	193nm
• KrCl	222nm
• KrF	248nm
• XeBr	282nm
• XeCl	308nm
• XeF	351nm
Metal Buharı Lazerler	
• Copper	578 & 510nm
• Gold	628nm
• HeCd	325 & 442nm
N ₂ Lazer	337.1nm
Chemical Lasers (HF)	

II. 4. 1. CO₂ Lazeri

Karbondioksit Lazeri, endüstriyel uygulamada en yüksek çıkış gücüne sahip bir moleküler gaz lazeri sistemidir [14].

CO₂ Lazer bir gaz lazeridir. Lazeri oluşturan aktif ortamda % 5 Karbondioksit, % 10 Nitrojen ve geri kalan kısımda Helyum bulunmaktadır. CO₂ gaz lazerlerinin çalışma prensibi hepsinin aynıdır. Fakat bunların tasarımları Lazer üreten şirketlere göre değişmektedir. Lazer üreteç boşluğunun içerisindeki soğutucu gaz karışımı ve uyarılma şekilleri farklı olabilmektedir. Farklı Lazer Güç Üniteleri tasarlanmaktadır. CO₂ molekülünü uyararak için **kimyasal** bir katalizöre ihtiyacımız vardır. Burada kullanılan Nitrojen bir katalizör gibi görev yapar. Şekil II.7 ' de Nitrojen üzerindeki enerjiyi CO₂ molekülüne transfer etmektedir.

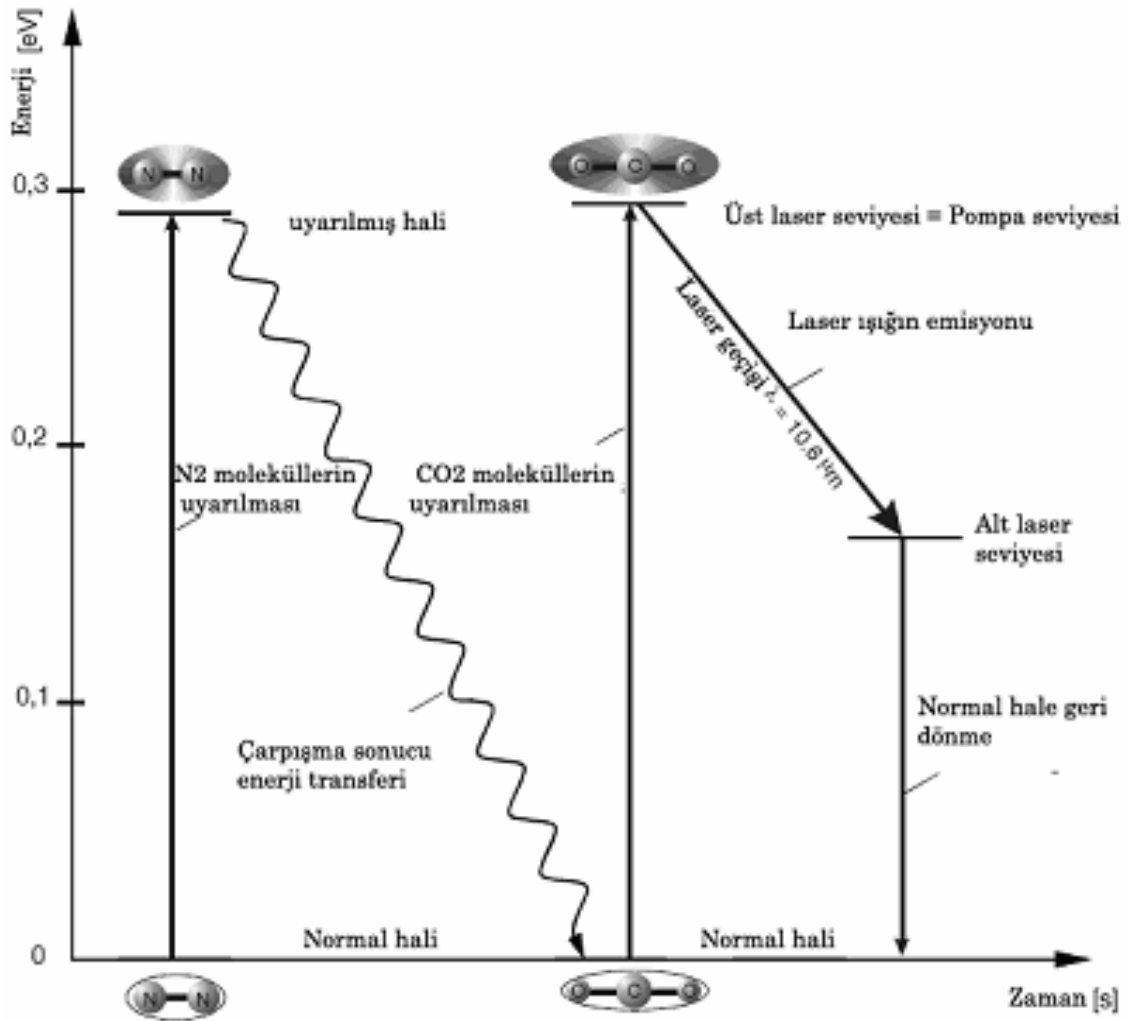


Şekil II.7 N₂ Molekülünün Enerjisinin CO₂ Molekülüne Transferi

Şekil II.8’de nitrojen molekülü tarafından CO₂ molekülünün en üst seviyede uyarılması gösterilmiştir. Başka bir ifadeyle pompalanmıştır [16].

Helyum’un buradaki görevi ise moleküller arasında meydana gelen çarpışmalardan ve CO₂ molekülünde depolanmış enerjinin transferi sırasında ortaya çıkan ısıyı soğutmaktır [19]. Darbe boşalması sırasında alt lazer seviyesini hızla boşaltmak ve yüksek ısıl iletkenliğiyle gaz karışımını soğutarak alt seviyenin termik bir yüklemeye maruz kalmasını engellemektedir [14].

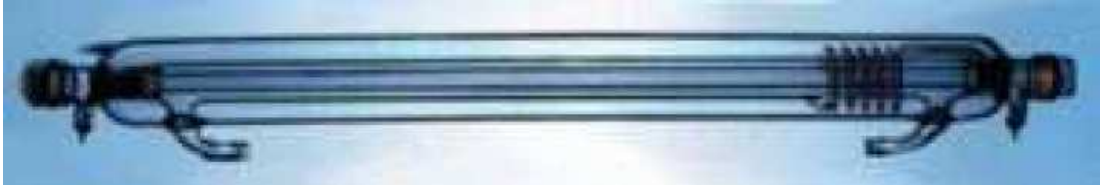
Lazerden çıkan dalga boyu 10.6 µm ‘dir. Gözle görülmektedir ve kızıl ötesi (infrared) dalgaboyu arasında yer almaktadır. 10 W gücünden başlayarak 45 kW gücüne kadar istenilen güçlerde üretilmektedir. Elektrik verimliliği hakkında farklı veriler olmakla birlikte yaklaşık olarak % 10’ dur. Yüksek güçlü bir endüstri Lazer çeşitidir. Geniş bir kullanım alanı vardır. Malzeme işlemede; kaynak, kesme ve yüzey işlemlerinde kullanılmaktadır [18,19].



Şekil II.8 CO₂ Lazerin Uyarılma Prensibi

CO₂ Lazerin çıkış gücü ve ışın kalitesi her şeyden önce gaz akış metotlarına bağlıdır. Optik kavitenin içerisindeki gazların akış şekli direk olarak CO₂ molekülünün uyarılmasını etkilemektedir. CO₂ Lazerlerinin sınıflandırılması akış şekline göre olmaktadır. Bunlar: Eksenel akış, capraz akış ve akış olmayan olarak üç gruba ayrılır. Lazerler ayrıca güçlerine göre, soğutma çeşitlerine ve optik kavitenin sekline göre sınıflandırılabilirler [5,14].

Yavaş Akışlı Eksenel Lazerler ; cam tüpün (10 – 14 mm çapında)içerisinde gaz yavaşça hareket etmekte, soğutmak için etrafında su veya başka soğutucu hareket etmektedir. Şekil II.9 ' da tüplerin uzunlukları lazerin çıkışına bağlı olarak farklı olmaktadır. Gücü 50 -70 W arasındaki bir lazer tüpünün uzunluğu 1m dir [29].



Şekil II.9 Lazer Tüpü

Tüplü lazerlerin avantajları:

- Çok iyi odaklanabilen ışın demeti
- Darbeli (pulse) kullanımda yüksek ışın demeti
- Karmaşık bir yapısı olmaması
- Bakımının kolay olması

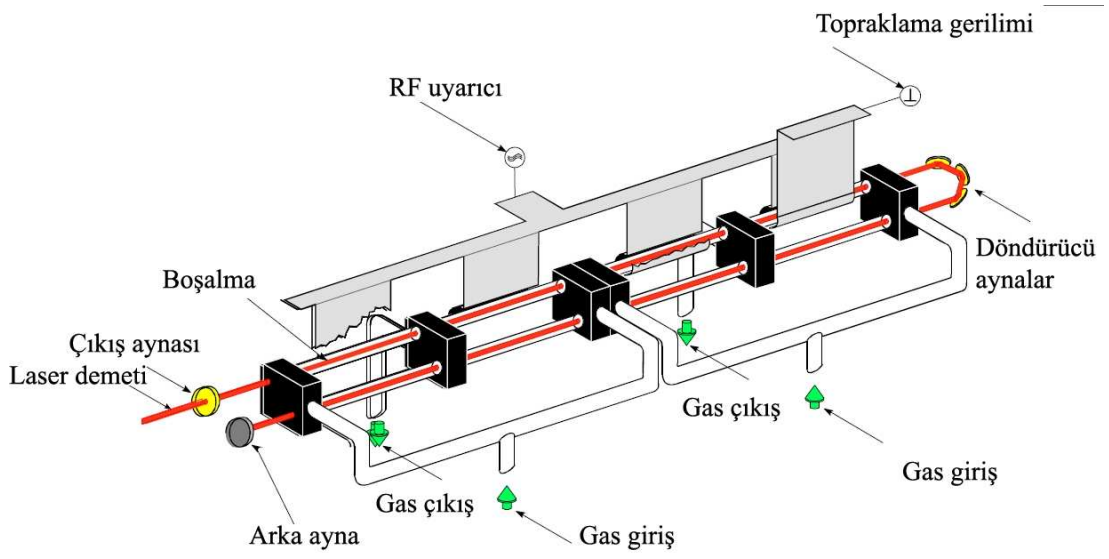
Tüplü lazerlerin dezavantajları:

- Tüpün uzunluğunun çok büyük olması
- Limitli çıkış gücüne sahip olması

Tüplü lazerlerle yüksek güçlü lazerler elde etmek için uzun tüp gereklidir. Bir tane 2 kW Lazer yapmak için 20 tane lazer tüpünün seri bir şekilde olması lazım. Bunun düzenli bir şekilde monte edilmesi çok zor olmaktadır [29].

Hızlı Eksenel Akış Lazerler; bu lazerlerde gazı bir üfleyici veya santrifüj pompa ile gaz hızlı bir şekilde lazer tüpünün içerisinde hareket etmektedir. Şekil II.10'da bundan dolayı sıcaklığı artan bölgede gaz kısa bir zamanda dolaştığı görülmektedir. Gazın hareketi ses hızına yakın olmaktadır [29].

a)



b)



Şekil II.10 a) Hızlı Eksenel Akışlı CO₂ Lazer Şematik Sekli b) Rofin Sinar'ın SR Serisi

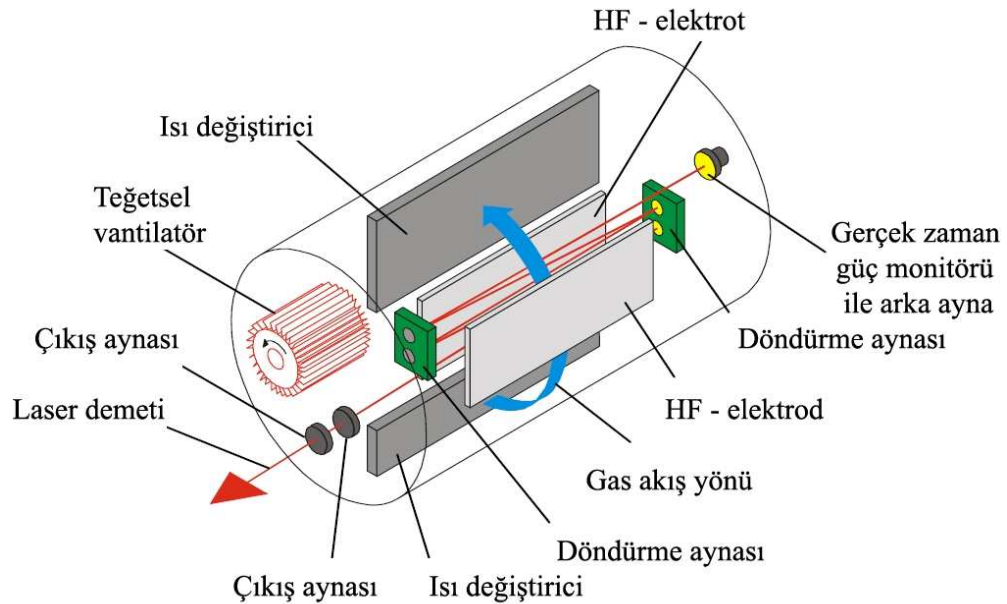
Gaz tekrar dolaşmadan önce ısı değiştiriciler tarafından soğutulmaktadır. 20 kW gücünde Hızlı Eksenel Akışlı Lazer'le Yavaş Eksenel Akışlı Lazer kıyaslandığında lazer tüpünün uzunluğundan çok büyük yer kazanılmaktadır. En büyük dezavantajları: Gazı üfleme aletinin veya santrifüj pompanın maliyeti ve bakım sorunlarıdır [29,20,21].

Hızlı Akışlı Lazerler az yer kaplayan tasarımlar ile çok yüksek güçlere çıkmaktadır.



Şekil II.11 Rofin Sinar HF Uyarımlı Çapraz Akışlı CO₂ Lazer

Çapraz Akışlı Lazer'ler yüksek frekansla (HF) uyarılmaktadır. Şekil II.11'de yeni yüksek frekanslı – CO₂ avantajı ise düşük çalışma maliyeti, endüstriyel tasarımıdır. Kaynak ve yüzey işlemlerinde ideal lazer ışının profilidir. Pazarlamada, endüstriyel uygulamalarda kullanılan yüksek güçlü lazerler ön plana çıkmaktadır. Yüksek frekanslılar en az yer kaplamakta ve kolaylıkla otomasyon üretim sistemine kurulabilmektedir [5,20].



Şekil II.12 Çapraz Akışlı CO₂ Lazer

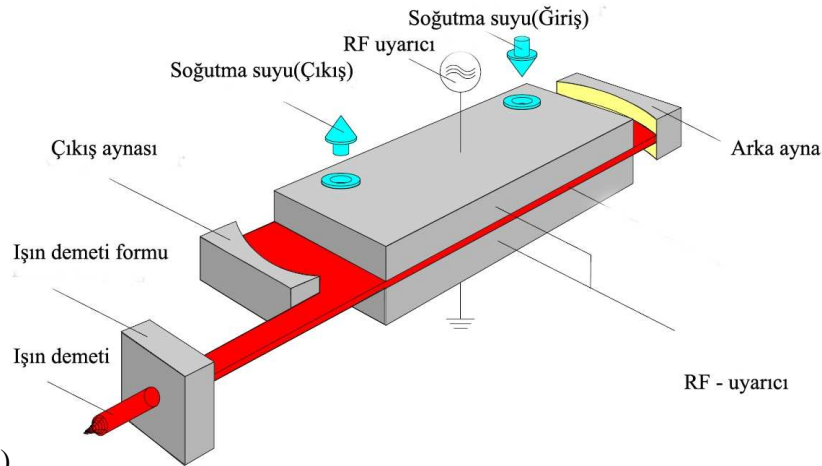
Çapraz Akışlı Lazer üreticilerde; içinde bulunan çoklu aynalar vasıtasıyla ışın demetinin uzun bir yol alması sağlanır. Grafit kompozitli tüpün içerisinde optik

elemanlar sabitlenmiştir. Deşarj olmuş bölgeye teğetsel vantilatör ile lazer gazı sirkülasyonu yapılmaktadır. Isı değiştiriciler tarafından sistemin soğuması sağlanmaktadır [5,29,20] .

Şekil II.12. ' de Yüksek güçlü bir lazer demetinin elde edilmesi ;gazın akış şekli, yüksek frekans, optik olarak alınan mesafe ve optik elemanlarının birbirlerine açıları en uygun şekilde tasarlandıktan sonra elde edilebilir [29].

Yayıma soğutmalı yüksek güçlü lazerler popüler olmaya başladı. Şekil II.13 'te gösterilmiştir. Bu lazer sisteminin tasarımında iki düz bakır plaka birbirlerine kapalı şekilde yerleştirilmiştir. Aynı zamanda plakalar bir elektrot gibi kullanılarak üzerlerine RF verilerek uyarılma sağlanmaktadır. Plakaların soğutulması üzerlerinde bulunan su giriş ve çıkışları ile yapılmaktadır. Böylece diğer sistemlerde olduğu gibi tüpünün içerisine lazer gazı gönderecek bir vantilatör veya türbine ihtiyaç olmamaktadır. Birbirlerine paralel olarak tam yansıtıcı aynalar kullanılmıştır. Diğer sistemlerde ise aynaların bir tanesi yarı yansıtıcı olarak kullanılmaktadır. Meydana gelen lazer demetinin seklide TEM₀₀ mod dur [20].

a)



b)

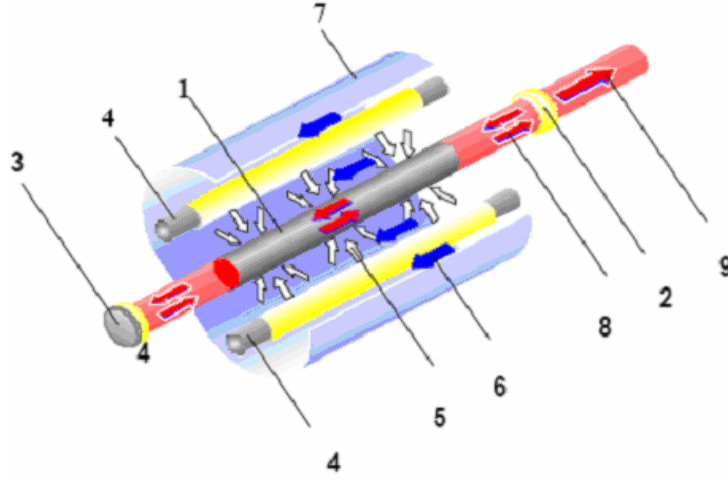


Şekil II.13 a) Yayılma Soğutmalı CO₂ Lazer b) Rofin Sinar DC Serisi

Gaz karışımlarının uyarılmasında elektrik deşarjı kullanıldı. Bu yöntemle CO₂ lazer demeti yapımında başarılı olundu. Uyarılmalarda doğru akım (DC), Radyo frekansı (RF) ve yüksek frekans (HF) kullanılmaktadır. Doğru akımla (DC) gaz tüpün her iki son tarafına anot ve katot yerleştirilerek uyarılır. Bunların arasına bir voltaj uygulanarak gaz karışımının uyarılması başlatılmaktadır. DC akımla uyarılmasının avantajı, uyarılan sistemin verimliliğinin çok yüksek olmasıdır. Toplam sistem verimliliğinin yaklaşık olarak %10 kadardır. Ayrıca DC akım ünitesi (power supply) oldukça basit, bakımı kolay ve servis maliyeti azdır. Radyo frekansı ile uyarılmada, iki yüzeyi geniş bakır elektrotlar arasından bir RF gaz deşarjı uyarılması yapılmaktadır. Şekil II.13'te iki elektrot arasındaki kısa mesafeden dolayı maksimum ısı yayılması olmaktadır. Elektrotların üzerindeki bu ısıyı soğutmak için su kullanılmaktadır. Böylece yüksek güç yoğunluğu elde edilmektedir [29].

II.4.2.Nd: YAG Lazeri (Neodymium: Yttrium Aluminum Garnet)

YAG; Yttrium – Aluminium – Granat ' ın kısaltılmış seklidir. Nd: YAG lazer bir katı hal lazeridir. Dalga boyu 1.06 µm dır. Bu Lazer türünde lazer yayan eleman YAG kristal rodun içindeki Neodim' dir. Devamlı ve darbeli (pulse) olarak lazer elde edilmektedir. %3 ile % 5 arasında verimliliği olmaktadır. Verimliliğinden dolayı endüstride kullanılmaktadır. Tipik verim halinde, kristalin %1 'i iyon haline geçer. Gazlara göre katı bir cisimlerin atomları daha yoğun şekilde dizildiklerinden, birim hacimde çok atom bulundurlar. Bu nedenle katı cisim lazerinin amplifikasyonu ve çıkış yoğunluğu çok yüksektir [14]. Genel olarak lazer roddunun çapı 10 mm ve uzunluğu 200 mm 'dir. Bunlar sırayla dizilebilir ve CO₂ Lazer'den çok daha karmaşık olmaktadır. Nd: YAG Lazer'in ana parçası Nd:YAG kristalidir. Şekil II.14 ' de gösterilmiştir [29,20].



- | | |
|-------------------------------|-------------------|
| 1 Aktif ortam Nd:Yag kristali | 6 Soğutucu su |
| 2 Yarı geçirgen çıkış aynası | 7 Yansıtıcı |
| 3 Tam yansıtıcı arka ayna | 8 Uyarılmış foton |
| 4 Uyarıcı lamba | 9 Lazer demet |
| 5 Pompalanan ışık | |

Şekil II.14 Nd:YAG Lazerin Şematik Sekli

Neodim' in uyarılması, yüksek güçlü ark lambalarının ışığıyla yapılır. Yansıtıcı paneller ile ışık Nd:YAG kristalinin üzerine yansıtılır. Işığa maruz bırakılan Nd:YAG kristalinde, Neodim bu ışığı absorbe ederek uyarılmış hale getirir. Bu uyarma seviyesinde geçen süre çok kısadır ve iyon, hızla üst lazer seviyesinin biraz üzerine çıkar. Bu sırada serbest kalan enerji, ısı enerjisi olarak kristale geçer [14].

Yüksek güçlü lazerler elde etmek için çoklu lazer rodlarına ihtiyaç vardır. Şekil III.15. Bunların dizilmesi için başka bir resonatöre gerek yoktur. Rodlar seri bir şekilde aynı ortamda dizilirler.

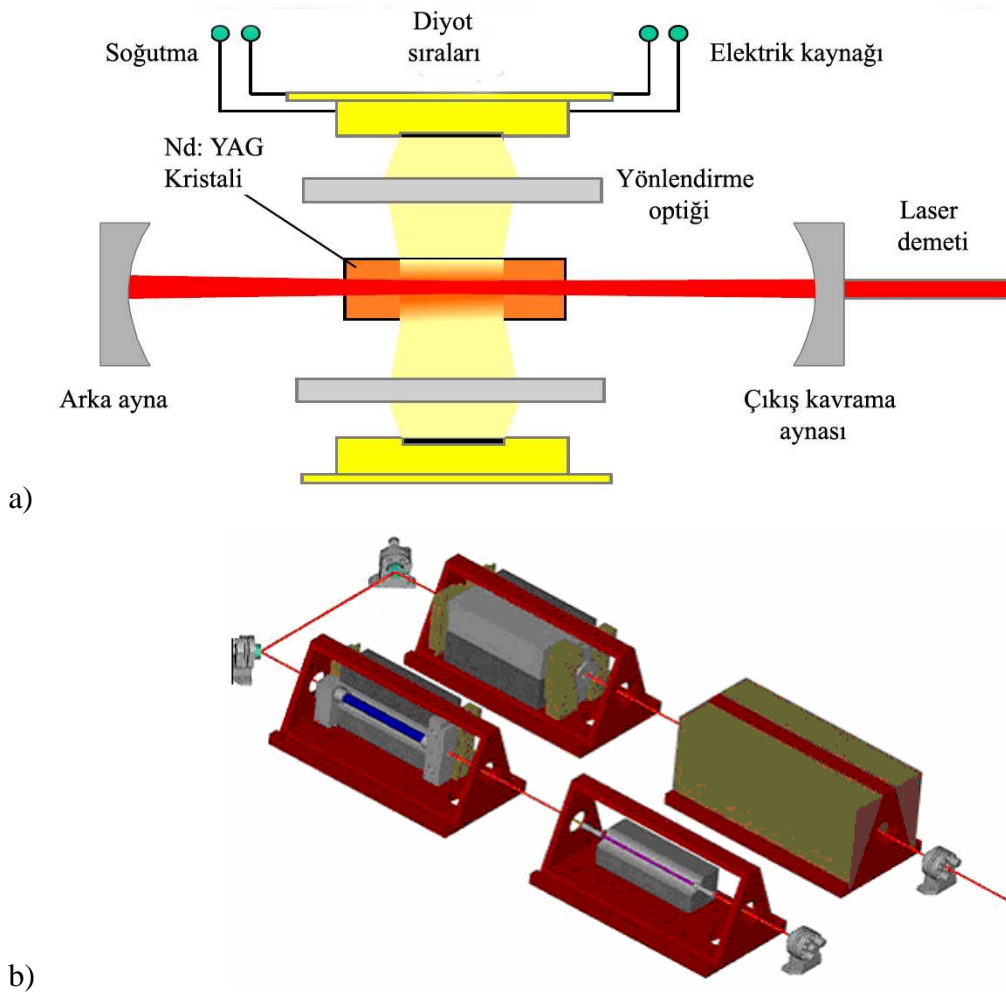


Şekil II.15 4 Tane Odalı Rofin Sinar 2.8 kW Nd:YAG Lazer

Nd: YAG lazer demeti, aynalar tarafından yönlendirilebilir, fiber optik kabloların içerisinde hareket ettirilip yönlendirilebilir. Lazer demetinin küçük alanlarda kolay hareketi çok zordur. 5 kW çıkış gücüne sahip Nd:YAG lazeri 0.6 mm çapında fiber kablo ile aktarımı yapılmıştır. Bir alman şirketi olan TRUMPF 2004 yılında pazarlamaya başlamıştır. Yüksek güçlü CO₂ Lazer'i fiber optik ile taşınmamaktadır. Endüstriyel Nd: YAG lazerlerin kullanımı için fiber optik kabloların tasarımı yapılmaktadır [20].

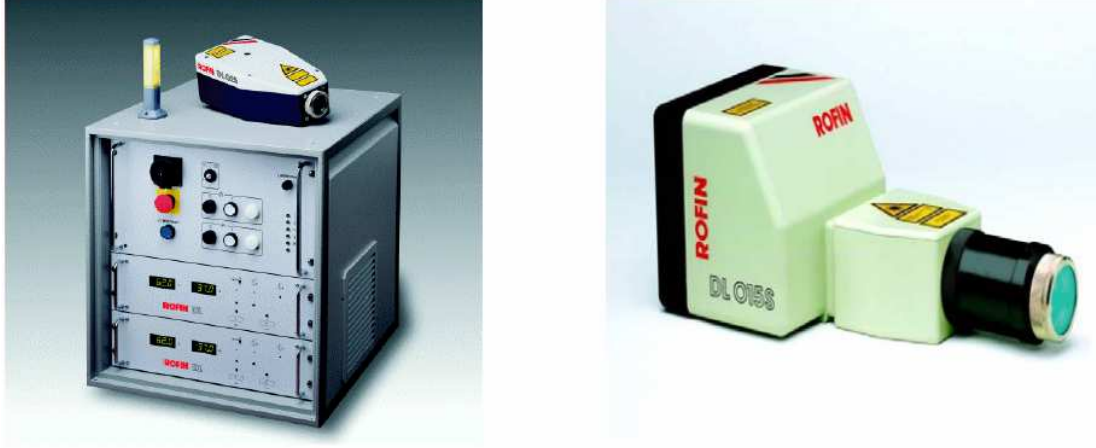
II. 4. 3. Diyot ve Diyot Pompalı Nd:YAG Lazerler

Nd:YAG lazer teknolojisinde uzun zamandanberi lambalar kullanılmaktadır. Gelecekte kullanılacak olabilmesinin sebebi ise Nd:YAG lazerin düşük maliyetli olmasıdır. Bu yüksek güçlü lazer teknolojinin ana avantajı ise çok kısa spektral çıkışa sahip oluşudur. Düşük termik nüfusundan dolayı diyot pompalı Nd:YAG lazerler çok iyi ışın kalitesine sahiptir. Ayrıca çok az yer kaplaması, soğutma ihtiyacının az olması, diyotların ömürlerinin lambalara göre uzun olmasıdır. Şekil II.16 ' da gösterilmiştir.



Şekil II.16 a) Tek rodlu diyot lazer şematik şekli b) 4 tane diyot pompalı Nd:YAG lazer

Günümüzde yüksek güçlü diyot lazerler kaynak ve yüzey işlerinde kullanılmaya başlanmıştır[22]. Diyot lazerlerin en büyük avantajı yüksek verimliliği (%50 e kadar çıkabilmekte) , düşük işletme maliyeti ve çok küçük boyutta olmasından dolayı robotlara ve makinelere çok kolay monte edilmesidir [29].



Şekil II.17 Rofin Sinar 1.5 kW diyot lazer

II. 4. 4. Excimer Lazerler

Excimer lazeri de bir soygaz ve halojen karışımdan meydana gelen bir gaz lazeridir.

Soygaz ve halojen atomlarının karışım oranlarına bağlı olarak, elde edilen dalga boyları 0.15 μm – 0.35 μm arasında değişir. Aşağıdaki Tablo II.2. ' de gösterilmiştir.

Excimer lazerinin tahriki için gerekli olan yüksek pompalama performansı için puls tahriki düzeneği ve enerjiyi boşaltmaya yarayan Tyatron- Şalteri kullanılmıştır.

Gaz boşaltımında tüm hacim homojen olarak doldurulabilmesi için bir “ön iyonlaştırma prosesi’ne” ihtiyaç vardır. Elektrotlar vasıtası ile oluşturulan ark boşalmasında oluşan UV ışınları ile gerçekleştirilen “ön iyonlaştırma” yapılmaktadır [5,17].

Tablo II.2 Başlıca Excimer Lazerler

Lazerler	Dalga boyları
F ₂	157nm
ArCl	175nm
ArF	193nm
KrCl	222nm
KrF	248nm
XeBr	282nm
XeCl	308nm
XeF	351nm

II. 5. LAZERLERİN KARSILAŞTIRILMASI

Endüstriyel uygulamalarda Lazer sistemlerinin karşılaştırılması aşağıdaki Tablo II.3 ' de verilmektedir.

Ömür, verimlilik ve maliyet : ilk Diyot Lazerleri'nin ortaya çıkmasından sonra bunların ömürlerinin çok kısa olduğu anlaşıldı. Malzeme işleme yapan diğer Lazer üreticileri ana dezavantajı olarak diyotların çok kısa ömürlü olduklarını gösterdi. Fakat Diyot Lazer üreten firmalar bu lazerlerin ömrünü 10,000 çalışma saati olduğunu belirtti ve bu zaman periyodunu garanti etti [24].

Lazer çeşitlerinin çalışma ve bakım maliyeti arasında bir kıyaslama yapıldığı zaman, HPDL 'lerin diğerlerine göre daha düşük olmaktadır. CO₂ ve Nd:YAG Lazerlerinin bakım periyodu yaklaşık olarak 1000 – 2000 saat arasında olmaktadır. Diyot pompalı Nd:YAG Lazer'in bakım periyot zamanı, lamba pompalı Nd: YAG lazerden daha uzundur. Tüm Lazer'ler içinde en verimli lazer, Diyot Lazer'dir. Bu lazerin verimliliği %50'e kadar çıkabilmektedir. Teorik olarak verimliliği %90'a kadar olabilmektedir. CO₂ Lazer'in verimliliği %10'a, lamba pompalı Nd:YAG lazerin verimliliği %5'e ve diyot pompalı Nd:YAG verimliliği % 15'e kadar çıkabilmektedir. HPDL'ler verimlilikte halen en önde ve maliyeti devamlı bir şekilde azalmaktadır. 3kW HPDL Lazer'in yaklaşık olarak maliyeti 155,000 ile 200,000 Euro arasında değişmektedir. Bu lazerin en büyük dezavantajı kesme işleminin yapılamamasıdır [24,25].

Tablo II.3 Diyot Lazer İle Konvansiyonel Lazerin Karşılaştırılması

Parametre	Direk Diyot	Nd:YAG{DP}	CO ₂
Verimliliği	%50 - %60	%3 - %5 {8 - 12}	%8 – %10
Dalgaboyu	0.8 µm – 0.98 µm	1.06µm	9.4 – 10.8 µm
Ortalama Yoğunluğu	103 – 106	105 – 107	103 - 108
Maksimum Güç [kW]	Sınırsız	5	50
Size [Sadece kafada]	1 - 2	20 - 50	200
Servis	Çok az	1000 {2000}	2000
Yenileme [saat]	Lazer bakımı [10,000]	Lambalar hariç {8,000}	Yok
Işının yön./ taşınması	Lensler , fiber	Lensler - fiber	Aynalar
Hareket ettirilmesi	Yüksek	Fiber ile çok düşük güçte	Hiçbiri
Yatırım [\$ / W]	65	180 / {250}	70
Yenilenmesi/ tekrar onarılması [\$ / W]	20 - 25	Yok	Yok

Aşağıdaki tabloda farklı lazer türlerinin kullanıldığı uygulama yerlerine örnekler verilmiştir; Excimer Lazer'in mikro işlemlerde, CO₂ Lazer'in kesme ve kaynak uygulamasında kullanılması gibi. Lazerlerin güçlerini karşılaştıracak olursak en güçlü olanı CO₂ Lazer'dir [26].

Tablo II.4 Lazerler ve Uygulamaları

LAZER	GÜÇ	DALGABOYLARI (μm)	UYGULAMALAR
CO ₂ – Hızlı akışlı	500W - 50 kW	10.6 μm CW	Kesme ve Kaynak
CO ₂ – Yavaş akışlı	10W - 500W	10.6 μm CW	Kesme, kaynak , Markalama
CO ₂ - TEA	50 W	10.6 μm Darbeli	Markalama
Nd:YAG	300W - 5000W	1.06 μm CW	Markalama, Delme,Kaynak, Kaynak,
Nd:YAG	30W - 300W	1.06 μm Darbeli	Elektronik uygulamalar, Markalama
Diyot – Pompalı Solid State	10W - 500W	1.06 μ Darbeli	Mikro işlemler
Excimer	50mW - 200W	0.246 μm	Mikro Delme, Kesme, Markalama
Diyot	1 mW - 400W	0.9 μm CW	Isıl işlemler , Markalama, Kaynak,

II. 6. LAZERİN UYGULAMALARI

Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda he geçen gün daha önemli hale gelmektedir. Bu konulardaki uygulama alanlarına kısaca bahsetmek gerekirse[27];

Endüstride:

- Her türlü malzemeyi çok hassas bir şekilde kesme, kaynak, delme, eritme, lehimleme, markalama ve şekil verme işlemleri.
- Mikro elektronikte dirençlerin aktif veya pasif olarak % 0,01 hassasiyetinde üretilmeleri.
- Chip üretimde hat kalınlıklarının 0,25 µm ' den az olarak desenlendirilmesi.
- Yeni malzemelerin analiz işlemlerin yapılmasında,
- Yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün ölçümü,
- Yüzey sertleştirilmelerinde,

Bilimsel araştırmalarda:

- Çok hassas bilimsel ölçümlerde,
- Yerküre üzerinde hareketlerin hassas ölçümü,
- Malzemelerin kimyasal analizinde,

Haberleşmede:

- Yeryüzü ile uydular arası haberleşme sistemlerinde,
- Dünya üzerinde haberleşme ağında fiber-optik sistemlerle birlikte kullanılması,
- Yüksek yoğunlukta ses ve görüntü bilgileri depolanması(CD, DVD, VCD)

Tıp alanında:

- Zarar görmüş dokuları keserek alma,
- Yaraları iyileştirmek,
- Kanamayı durdurmak,
- Göz retinasında oluşan zedelenmeleri gidermek,
- Estetik ameliyatlarda,
- Derideki istenmeyen kılların ve lekelerin temizlenmesinde,

Askeri alanlarda:

- Açısal hassasiyet (ışınımın doğrusal şekilde olması),
- Uzun mesafe 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)

II. 6. 1. Endüstride Lazerin Başlıca Kullanma Sebepleri

- Kontrolü ve otomasyonu kolaydır.
- 3 boyutlu sac plakalarının kesimi yapılabilir.
- 3 boyutlu boru veya farklı profil parçalarını kesimi yapılabilmektedir.
- İşleme sırasında parçaya temas yoktur.
- İşleme noktasında lokal enerji yoğunluğu oluşturulduğundan malzemeye ısı geçişi az.
- Kesim hattı daha dardır.
- Köşelerde iyi sonuç verir.
- Farklı kalınlıklardaki ve farklı geometrilerdeki parçaları aynı anda kesilebilir.
- Metal olmayan malzemeleri kesebilirsiniz.
- Sadece lazer kafasını değiştirerek aynı lazer makine ile kaynak yapılabilir.
- Çok sert, gevrek veya sünek malzemeler işlenebilir.
- Düşük yayılma özelliği.
- Çok küçük çaplarda odaklanabilme özelliğidir.
- Kesici takım ihtiyacı yoktur ama son gelişen teknoloji ile yeterli kalınlıktaki sac plakanın üzerine kılavuz açılabilir. Burada kesici takım kullanılmaktadır.
- Kullanılan CAD / CAM programları sayesinde kullanılan malzemeden maksimum kazanç sağlar.
- Kullanılan CAD / CAM programları sayesinde hızlı çizim değişikliği yapılabilir.
- Yüzeyleri kaplanmış sacları kesebilir.
- Sac işleme makinelerine göre çok daha gürültüsüz çalışmaktadır.
- Kesim sırasında malzeme ile her hangi kimyasal reaksiyon olmamaktadır [27].

II. 6. 2. Endüstride Lazerin Uygulamaları

Lazerin üretim alanında ana uygulamalarında; kesme, kaynak, delme, markalama ve malzemelerin yüzey işlemleri yapılmaktadır. Bu sektörlerin başında elektrik endüstrisi, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi ve metal endüstrisi gelmektedir.

Geleneksel malzeme işleme metotlarına göre teknik ve ekonomik açıdan birçok üstünlükleri vardır. Endüstride en çok kullanılan iki tip Lazer vardır. Bunlar CO₂ ve Nd: YAG Lazeridir [29,30].

Tablo II.5 Lazer İle Malzeme İşleme Uygulamaları

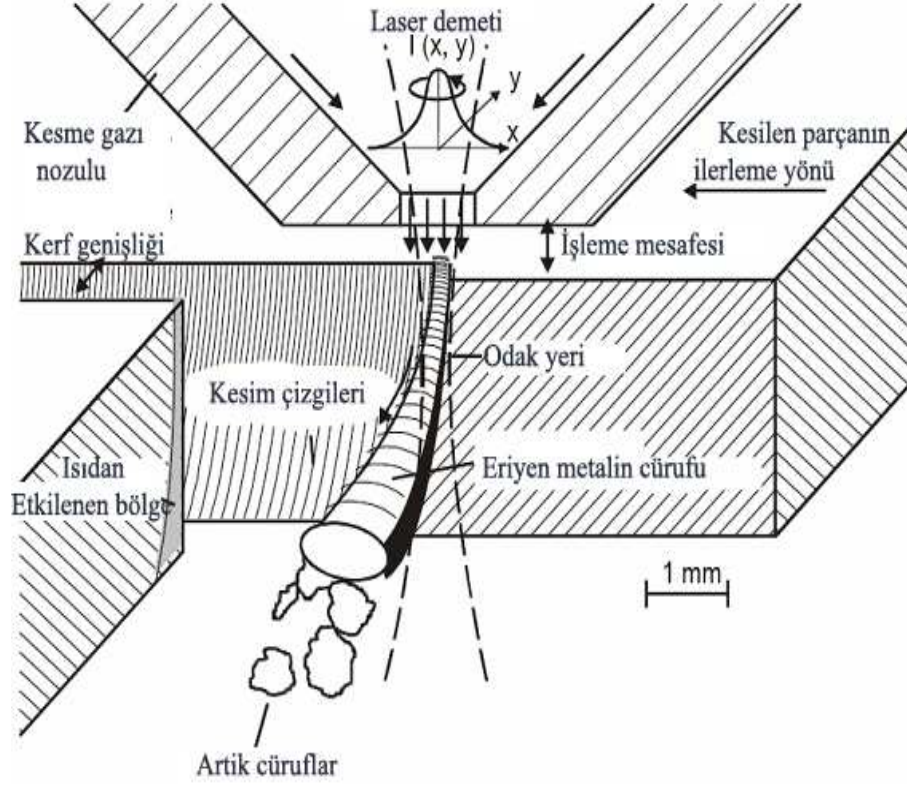
<i>Yüze İşlemleri</i>	<i>Malzeme Hareketi</i>	<i>Birleştirme</i>
Yüze kaplama (3D makine elemanlarını direk lazer döküm içinde işlenmesi)	Kesme	Kaynak
Yüze Sertleştirme	Delme	Lehimleme
Yüze Eritme	Taş veya Malzeme üzerinde kabuk kaldırma	Sert lehim kaynağı
Kaynak		
Markalama		
Çizgili Boyama ve Temizleme		
Eritme işlemi		
Parlatma (Cam malzemeler üzerinde işlemler)		
Termal Sprey		
Yüze yazıları		
Stereolithography		

II.6.2. 1. Lazer Işını İle Kesmenin Prensibi

Torna ve işleme merkezlerinden farklı olarak: Lazer işleme makineleri, işlenecek malzemeyi 0.5 mm'den küçük çaplı bir lazer ışık huzmesi ile eritir ve buharlaştırır. Sertliği veya yoğunluğu ne olursa olsun, tüm malzemeler çabuk ve pürüzsüz olarak kesilebilir. Kesilmesi zor malzemelere örnek: titanyum ve takım çeliği verilebilir. Dokunmasız işleme gerçekleştirildiğinden sabitleme-düzeltilme gerektirmez.

Maksimum işlenebilecek malzeme kalınlığı Lazer Osilatörü'nün çıkış gücü ile belirlenmektedir. Örneğin 4kW'lık bir Lazer; 15mm' lik paslanmaz çeliği, 20mm' lik takım çeliğini, 25mm lik yumuşak çeliği kesebilmektedir. Ek olarak; üç boyutlu lazer

işleme makineleri yalnız düz tabakaları değil, üç boyutlu kompleks parçaları da kesebilmektedir [31].



Şekil II.18 Lazer Işını İle Kesmenin Prensihi

Lazer ışını ile kesme prensibi: Işının kesilecek malzeme üzerinde odaklanarak, yüksek yoğunlukta enerji yardımıyla, malzemenin erime sıcaklığına kadar ısıtılması ve oluşan cürufların uygun bir gaz ile kesme bölgesinden uzaklaştırılmasına dayanmaktadır [30].

Kesme sırasında çoğunlukla oksijen gazı (O_2) kullanılmaktadır. Kesme sırasında sıvı haldeki malzeme ile oksijen egzotermik bir reaksiyona girerek kesme bölgesine ek bir enerji transferi sağlanır ve böylelikle daha yüksek kesim hızlarına ulaşılır. Lazer ışını ile kesimin tipik özelliği; yüzeye dik olan kesme kenarıyla düşük pürüzlülük elde edilmesi ve ısıdan etkilenen bölgenin dar olması sayesinde distorsiyon meydana gelmesidir. Bu nedenle lazerle kesimi tamamlanmış parçalar, ek bir işleme gerek olmadan hemen kullanılabilir.

II. 6. 2. 2. Lazer Işınıyla Kaynağın Prensibi

Lazer kaynağı son zamanlarda sanayide hızla gelişen bir uygulama olarak görülmektedir. Özellikle otomotiv sanayisinde alüminyum gövdenin kaynağı ve hava sanayisinde perçin teknolojisinin yerini almıştır [51]. Şekil II.19'da uçaklarda kullanılan örneği gösterilmiştir [51]. Genellikle endüstriyel CO2 ve YAG lazerleri olarak yer almaktadır.

Lazer kaynağının bazı avantajları: Hızlı kaynak yapabilme ve sonuç itibariyle daha düşük ısı girdisi gerçekleştirilmesi, kaynak bölgesinde yüksek nüfuziyet sağlaması ve malzemelerde kaynak sırasında görülebilen çarpılmaların düşük ihtimalli olmasını gerçekleştirmesidir. Yapılan laboratuvar testleri sonucu sertlik değerleri kopma, bükme ve çekme dayanım değerleri diğer kaynak uygulamaları ile kıyaslanamayacak kadar avantajlı olup malzemelerin öz değerlerine yakındır. Bu avantajlar lazer ışınının yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklanan olumlu özelliklerden ileri gelmektedir. Hızlı kaynak yapabilme özelliği, lazer gücünün aynı zamanda CNC kontrollü otomasyonlar desteğiyle yapılmasındandır[35]. Şekil II.20 ' de örnek Lazer Kaynak Makinesi gösterilmektedir [16].



Şekil II.19. Hava Sanayisinde Lazer Kaynağı

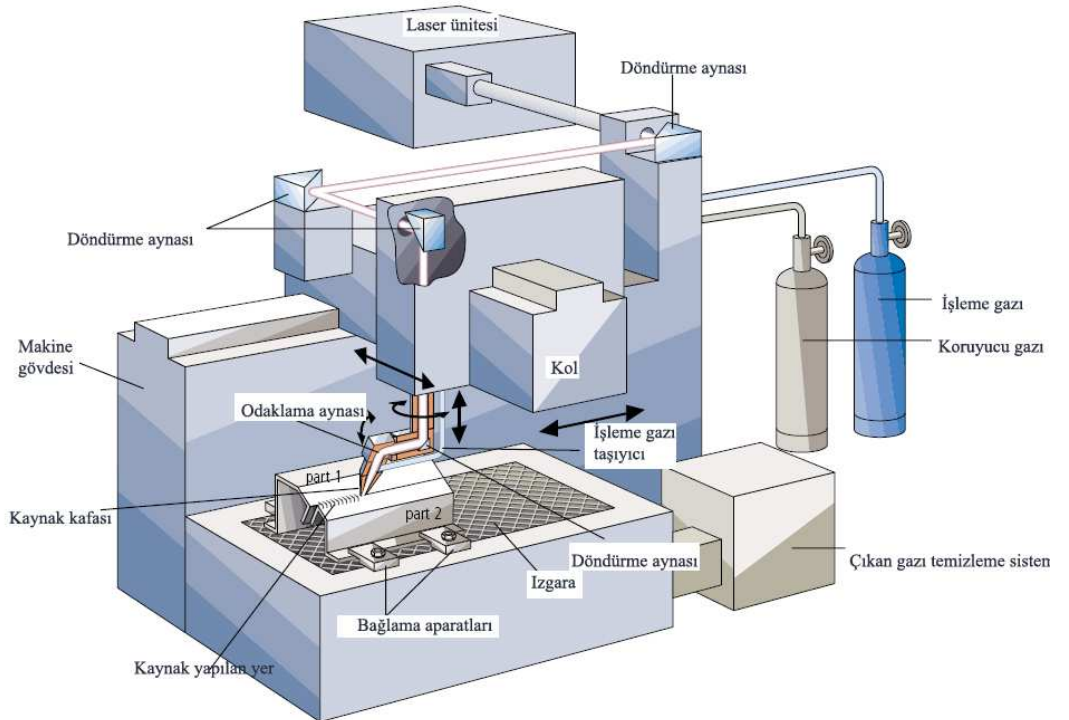
Lazer kaynağı uygulamasında herhangi bir dolgu malzemesine ihtiyaç duyulmaz. Lazer ışını doğrudan kaynak yapılacak malzemeye odaklanır. Lazer

kaynağındaki yüksek güç yoğunluğu 106 W/cm^2 'lik malzemeyle birbirinin etkileşmesini sağlamaktadır. Buna da ışın birleştirilmesi denilmektedir [35].

Lazer kaynağı sırasında diğer kaynak yöntemlerindeki gibi işlem verimliliğini arttırmak, kaynak kalitesini yükseltmek ve kaynak banyosunu korumak için koruyucu gaz kullanılmaktadır. Örneğin CO_2 Lazer kaynağında bu uygulama, kaynak uygulaması yapılacak parçaların cinsine göre değişebilmekte ve genellikle Helyum gazı kullanılmaktadır. Yüksek iyonlaşma potansiyeline sahip olan Helyum plazma oluşumunu azaltarak nüfuziyeti artırır. Böylece kaynak kalitesini büyük ölçüde yükseltir [35].

Bunun yanı sıra farklı uygulamalarda koruyucu gaz Argon veya karışım gazları olabilir.

Lazer kaynak uygulamalarımızda kullanmış olduğumuz endüstriyel gazların bir çoğunda lazer oluşabilmesi için özel gazların kullanılması gereklidir. Gazın kalitesi ve seçimi: Lazer'in güvenilirliğini ve işlemin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Dolayısıyla lazer gazlar her zaman yüksek saflıklarda olmalıdır.



Şekil II.20 Lazer Kaynak Makinesi

II. 6. 2. 3. Lazer Işınıyla Metal Yüzeylerin Kaplama Prensipleri

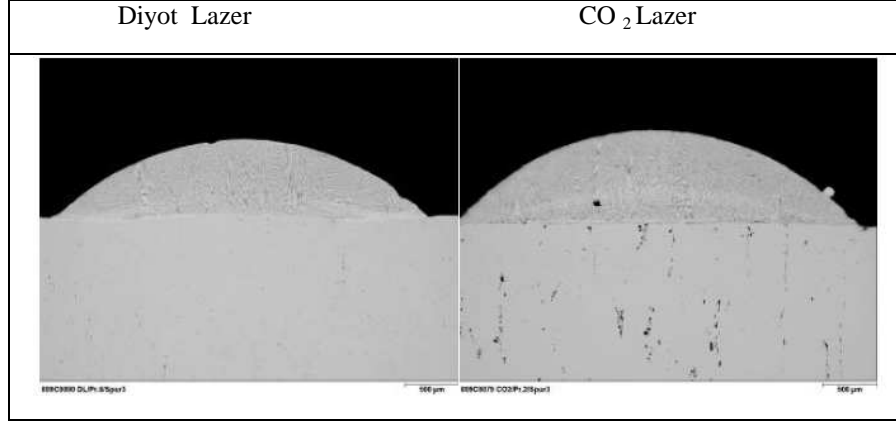
Lazer ile kaplama bir ileri endüstride kaplama teknolojisidir. Çeşitli makine parçalarının; yüksek sıcaklık, aşınma ve korozyondan dolayı kaplanması gerekir. Lazer ışını ile metal yüzeylerin kaplanması sırasında daha düşük ışın yoğunluğu ve daha geniş yüzeylere enerji geçişinin sağlanması amacıyla farklı tipteki lazer sistemi kullanılır [30].

Genelde lazer kaplamada CO₂ Lazer ve Nd: YAG Lazer çeşitleri kullanılmaktadır. Şimdiye kadar Diyot Lazer'ler kaplama uygulamaları için fazla bilinmiyordu. Şu an yüksek güçlü Diyot Lazer'in (HPDL) ortaya çıkması durumun değişeceğini göstermektedir. Çünkü bu lazerlerde düşük ışın kalitesi, kare şekline getirebilen ışın demeti ve çalışma aralığı kısadır. Bununla birlikte çok küçük olması, kolay kullanımı olması yüksek verimliliği olması, yatırılan para ve çalışma maliyeti azdır. Bu özelliklerinden dolayı diyot lazerin kaplamada kullanımı ilgi çekmiştir. Ayrıca tüm endüstri uygulamalarında ilgisini çekmektedir. Tabloda lazer gücü, verimlilik, elektrik tüketimi ve çalışma maliyeti açısından karşılaştırılmıştır [33].

Tablo II.6 Elektrik Tüketimi Açısından Karşılaştırma

Yaklaşık Olarak Çalışma Maliyetleri	CO ₂	Nd:YAG (Diyot Pompalı)	Diyot (HPDL)
Gerekli lazer gücü	5kW	3 kW	3 kW
Ortalama lazer çıkış verimliliği	% 10	% 10	% 30
Lazerin ortalama elektrik tüketimi	50 kW	30 kW	10 kW
Saatteki elektrik maliyeti @ 0.09 \$ / kWh	4.50 \$/hr	2.70 \$/hr	0.90 \$/hr

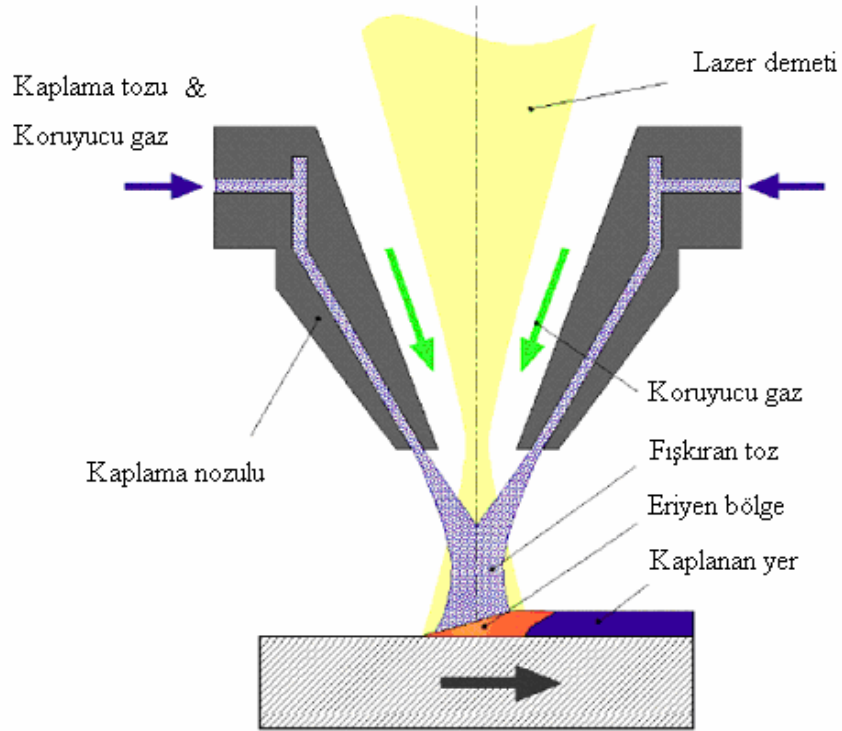
Çünkü maliyet ve kalite açısından HPDL çok üstündür. **Şekil de maliyet** açısından kıyaslaması görülmektedir.



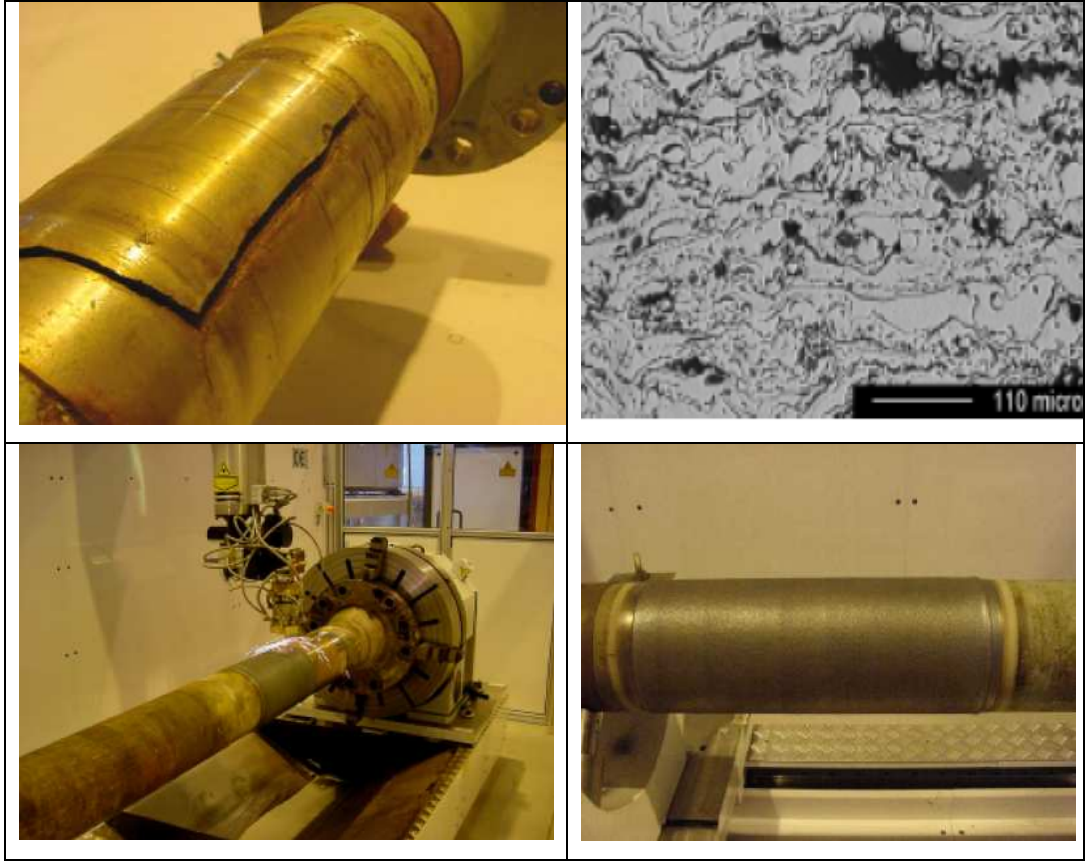
Şekil II.21 Diyot İle CO₂ Lazerin Kaplamasının Karşılaştırılması

Şekil II.21 'de diyot (HPDL) ile CO₂ lazerin kaplanmış yüzeyleri görülmektedir. Buradan çıkan sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

	Diyot Lazer	CO ₂ Lazer
• İşleme hızı	900 mm/min	900 mm/min
• Lazer Spot	4,5 x 4 mm ²	4,7 mm
• Arta kalan kısım	1,8 mm ²	2,1 mm ²
• Lazer Gücü	1400 W	3900 W



Şekil II.22 Koaksiyal Toz Püskürtmeli Lazer Kaplama



Şekil II.23 Lazer Işını İle Yüzey Kaplama Uygulamasına Ait Bir Örnek Bulunmaktadır.

Kaplanan yüzeyin kalınlığı 0,50 il 3,00 mm arasında değişmektedir.

Metal yüzeylerin lazer ışını ile kaplamasının avantajı; malzeme içinde nüfuz eden enerjinin lokal ve minimum seviyede kalıp hassas kaplama imkanı sağlanmasıdır. Şekil II.22 ve Şekil II.23 ' de şematik şekli ve uygulaması gösterilmektedir [33,34].

Lazer kaplama teknolojisini kullanıldığı alanlar [34].

- Motor krank şaftların onarımı
- Türbin kanatlarının onarımı
- Piston yüzeylerin ve segman kanalları
- Elektrik rotorlarının yatak yerleri
- Maliyeti yüksek olan motor valflerin temas yüzeyleri ve yüzeyleri
- Yüzeyleri aşınmış veya tahribata uğramış şaftların yüzeyleri
- Aşınmış plakalar
- Korozyona uğramış silindir yüzeyleri

- Nükleer santrallerin ana buhar valfları
- Büyük motorların valf rodaları
- Vidaların bozulmuş dişleri
- Makinelerdeki aşınmış dişliler

II. 6. 2. 4. Lazer Işınıyla Markalama

Bilindiği gibi teknikte markalama: Kağıt üzerindeki çizilen teknik resmi, gerekli aletleri kullanarak işlenecek parça üzerine çizme işlemidir [38].

Lazer markalama: Lazer kullanılarak çeşitli nesnelerin etiketlemesinin yapıldığı metottur. Lazer markalama prensibi, lazer demetinin optik aynalar tarafından yönlendirilerek nesnelerin üzerine vurmasıyla olur.

- Boyalı yüzey malzemesini kaldırarak şekiller yapılması.
- Kağıt , tahta , ağaç ve polimerilerin yüzeylerini kömürleştirme
- Plastik malzemeler içerisindeki boyalı maddeleri beyazlatma

Lazer ışın demeti; çok hızlı hareket eden iki tane aynaya bağlı galvo motor tarafından hızlı yazıların yazılması, sembollerin yapılması, bar kodların ve diğer grafik işlemlerin yapılmasıdır. Şekil II.24'te bunun yapılması için iki tane yöntem kullanılmaktadır. Birincisi vektör veya kafes tarayıcısı kullanarak yapılır. Burada lazer ışını hareket etmektedir. İkincisindeyse iş parçası hareket ettirilerek yapılmaktadır. Bu yöntemdeyse basit hızı iş parçasının hızına bağlıdır ve esnek değildir [39].Lazer markalama diğer markalama teknolojileri ile karşılaştırıldığında, mürekkepli yazıcı veya mekanik markalamadan avantajı, çok yüksek işleme hızı, düşük işletme maliyeti, devamlı yüksek kalite, otomasyon sisteminde çok esnek olarak yapılması ve çevreye yan etkisi olmaması şeklinde sıralanabilir [36].

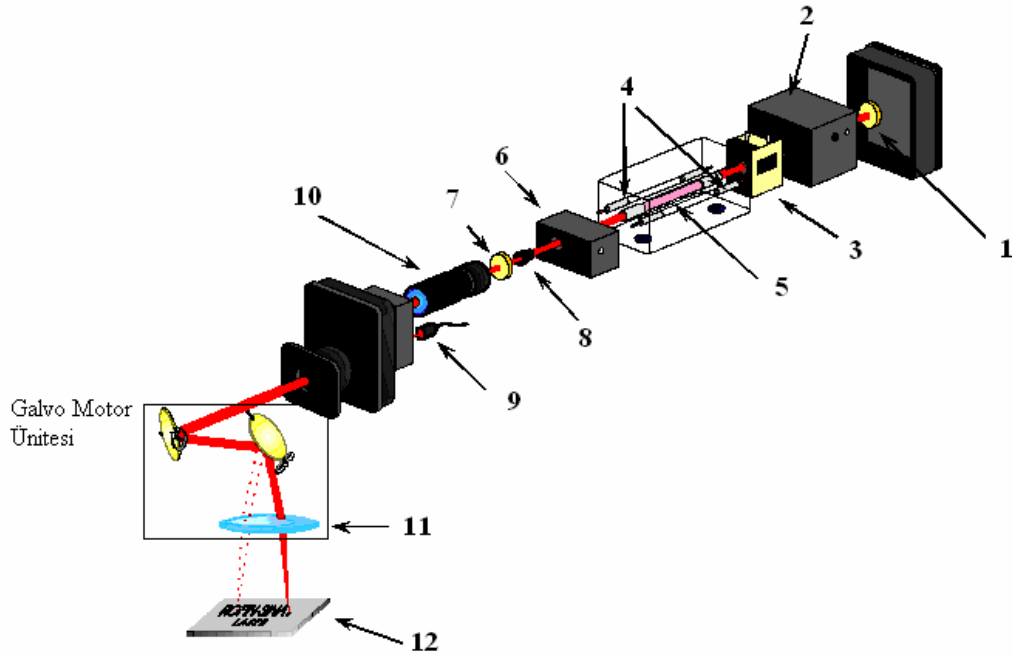
Tablo II.7 Tablo Markalama teknolojilerin karşılaştırılması

Markalama işlemi	Hız	Performans	Şekil esnekliği
Lazer	İyi	İyi	İyi
Kimyasal	İyi	İyi	Kötü
Fotoğraf	İyi	İyi	Kötü
Mürekkep	İyi	Kötü	İyi
Mekanik damga	İyi	İyi	Kötü

Lazerlerin yapıldığı metotları geleneksel markalama ve etiketleme metotlarıyla karşılaştırdığımızda çeşitli avantajlar sunduğu görülür.

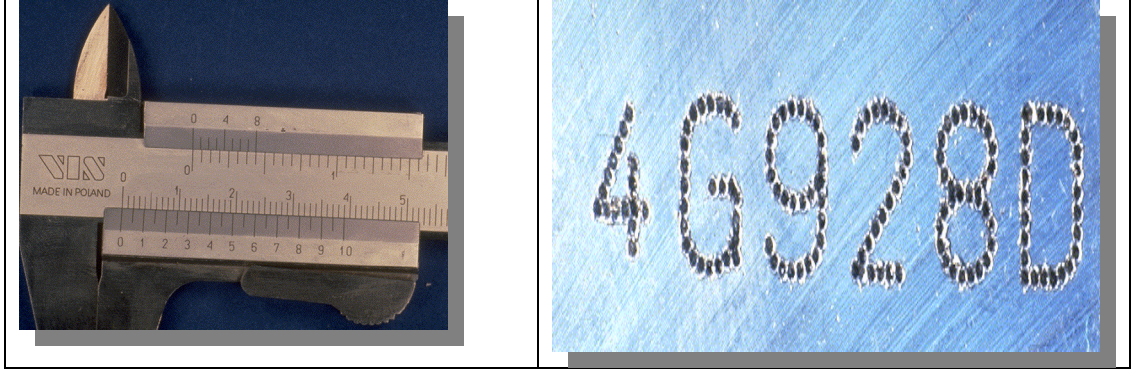
Avantajları:

- Yüksek kaliteli, kalıcı temiz markalama,
- Metot yüzeyle temas etmediğinden karakter bozulması yoktur,
- Üretim sistemlerine kolayca entegre edilebilirler,
- Yüksek hızlıdır.
- Takım değiştirme ve takım aşınması yoktur
- Kalibre – yüksek doğruluk, örneğin ölçü aletlerinde Şekil II.25 ' te gösterilmektedir.
- Yüksek sıcaklık direncinde takım aşınması olmaması Şekil II.26 ' da gösterilmektedir.



1. Tam yansıtıcı ayna
2. Kontak kutusu
3. Q – Anahtarı
4. Krypton ark lambaları
5. Lazer rodu
6. Işık kesici
7. Ön ayna
8. Lazer modu
9. Lazer diyot
10. Lazer ışını genişleticisi
11. Düz Mercek
12. Markalanan yüzey

Şekil II.24 Laser Markalama Makinesi



Şekil II.25 Kumpas Markalama

Şekil II.26 Motor Bloğu Markalama

II. 6. 2. 5. Lazer İle Yüzey Sertleştirme

Bazı uygulamalarda kullanılan çelik parçaların hem aşınma dirençleri, hem de darbe dayanımlarının yüksek olması istenir. Bunun için parçaların yüzeylerinin sert, merkezlerinin olabildiğince yumuşak olması gerekir. Bunu sağlamak için parçalara yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır. Çelik parçaların yüzeyleri sementasyon, nitrürleme, alevle, indüksiyon akımıyla ve lazerle sertleştirme yöntemleriyle sertleştirilebilirler [33,41].

Lazerle sertleştirmenin teknik faydaları:

- En yüksek yorulma dayanımının elde edilmesi
- Lokal bir yüzeyde işlem yaptığı için malzemede minimum çarpıklık
- 2 mm'lik derinliğe kadar sertleştirme yapabilmesi
- 2 – 60 mm arasında lazer demetinin izinin olması
- Sertleştirilmesi zor olan 3D boyutlu ve kompleks parçalara sertleştirme yapılabilmesi
- Doğru parametrelerin ayarlanması ve aynı işlemlerin tekrarlanabilirliği
- Çok küçük ölçülerde sapma
- İstenilen yüzey veya köşelerde sertleştirme
- Yüzeyde sıcaklık kontrolünün mümkün olması
- Kendiliğinden su verme
- Her türlü malzemenin sertleştirilmesi

- Yüksek yüzey sertleştirmede, süneklik kaybının düşük olması.

Lazer sertleştirmenin ekonomik faydaları [40,41]:

- Zaman ve maliyetten tasarruf sağlar
- Kompleks geometrik parçalar için özel sertleştirme aletine gerek yoktur
- Otomatik işleme yapıldığı için sertleştirme yüzeylerinin her yerinde kalitenin aynı olması
- Çok büyük parçaların büyük makinelere gerek kalmadan robotlarla yapılması Şekil II.28 ' de gösterilmektedir [37] .
- CNC makinelerinde kolayca kullanılabilirliği Şekil II.27 ' de gösterilmektedir.



Şekil II.27. Lazer Serleştirme Aletinin CNC Torna Tezgahına Entegrəsi



Şekil II.28. Hava Sanayinde Kullanılmak üzere Lazerle Yüzeyleri Sertleştirilmiş Mil

Tablo II.8 Kaynakta Kullanılan Lazerlerin Karsılaştırılması

	CO ₂	Nd-YAG	HPDL
Dalga boyu (µm)	10.6	1.06	0.8–1.0
Metal absorpsiyon (%)	5–10	25–35	30–40
Verimliği (%)	10–15	3–5	30–50
Lazer ışın hacmi(cm ³ /W)	1000	10	1
Maksimum güç (kW)	40	4	10
Maksimum güç yoğunluğu (W=cm ²)	108	109	106
Maliyeti (\$/W)	150–300	200–600	100–300

- Diyet lazerlerin optik kabloyla taşınabilmesinden dolayı, çok büyük makine parçalarının sertleştirilmesi için robotlar kullanarak ; çok az maliyet, yüksek kalite ve kısa sürede yapılabilmesi sağlanır(Şekil II.28 ' de gösterilmektedir).

II. 6. 2. 6. Lazer Destekli İşlemler (Laser Assisted Machining)

Günümüzde çok yeni olmakla birlikte üzerinde yapılan araştırmalar devamını sürdürmektedir. Özellikle sert ve parlak malzemelerin tornalama işleminde kullanılmaktadır [43]. İşlenmesi çok zor olan seramik malzemelerinin (Silisyum nitrit, Zirconia, Mullit) lazer yardımıyla tornalama işlemleri yapılmaktadır. Şekil II.29 ' de gösterilmektedir [42].

Kullanılan lazerler CO₂ , Nd:YAG ve Diyet lazerlerdir. CO₂ Lazer'in makineye montajı çok zor ve maliyeti yüksektir. Fakat Diyet Lazer ve Nd:YAG Lazerl'er fiber optik kablo ile taşınabildiklerinden çok kullanılışlı ve düşük maliyetli olmakta ve esnek hareketi sağlamaktadır.Yeni dökme demir alaşım malzemelerinin (HYPERCHROME®) sertlik değerleri 600 – 750 HB arasında olduğu için bu malzemelerin geleneksel makinelerle işlenmesi çok zordur [43].

LAM ile optimum işleme parametreleri.

- Minimum yüzey pürüzlülüğü
- Minimum lokal etki alanı
- Minimum takım aşınma ve maliyeti
- Minimum işleme zamanı
- Maksimum talaş kaldırma hızı
- Maksimum doğruluk

LAM de kullanılan değişken parametreler aşağıdaki gibidir.

- Devir sayısı
- Kesme hızı
- İlerleme
- Kesme derinliği
- Kesici takımın lazer ışınından uzaklığı
- Lazer ışının genişliği
- Lazer gücü

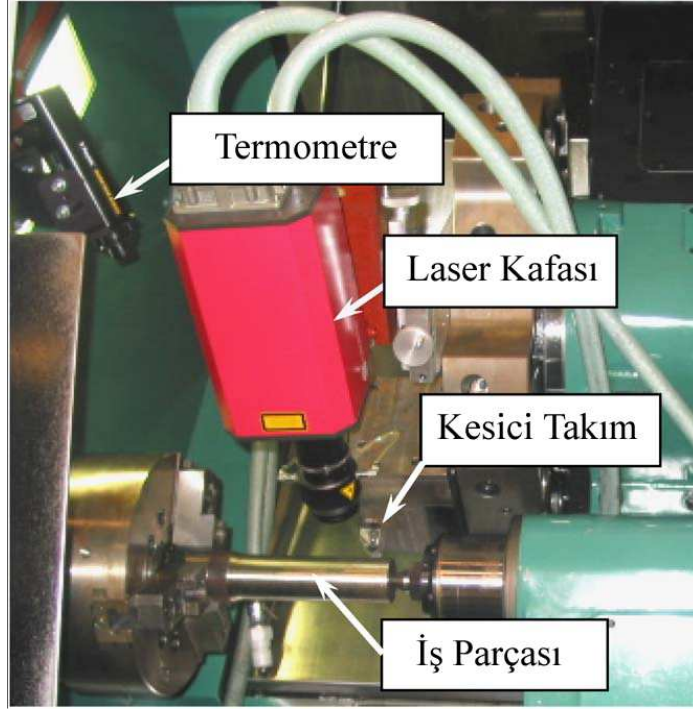
Ayrıca LAM e etki eden değişkenler

- Yüzey sıcaklığı
- Kesici takıma gelen kuvvetler
- Takım aşınması
- Yüzey düzgünlüğü

		
Silisyum nitür	Zirconia	Mullit

Şekil II.29 İşlemesi Zor Olan Seramik Malzemeler (Silisyum Nitür, Zirconia, Mullit)

Lazer sadece torna kesici takımının önüne temas etmektedir. Yüzeysel olarak burada meydana gelen sıcaklık kesimi kolaylaştırmıştır. Şekil II.30'da sistemin entegrasi gösterilmektedir. Burada kullanılan lazer yüksek güçlü Diyot Lazer'dir. CNC torna makinesine entegrasi CO₂ Lazer'e göre çok kolay ve maliyeti çok düşüktür [44].



Şekil II.30 Lazer Destekli Torna İşlemleri (LAM) Kurulumu

Lazer destekli frezeme işlemleri yapılmaktadır ancak lazer destekli torna işlemlerine göre daha azdır [45].

II. 6. 2. 7. Lazer Temizleme Sistemleri

Kontrollü yüksek lazerler: Üzeri kaplanmış, zamanla korozyona uğramış veya kirlemiş parçaların yüzeylerini buharlaştırarak temizler[46].

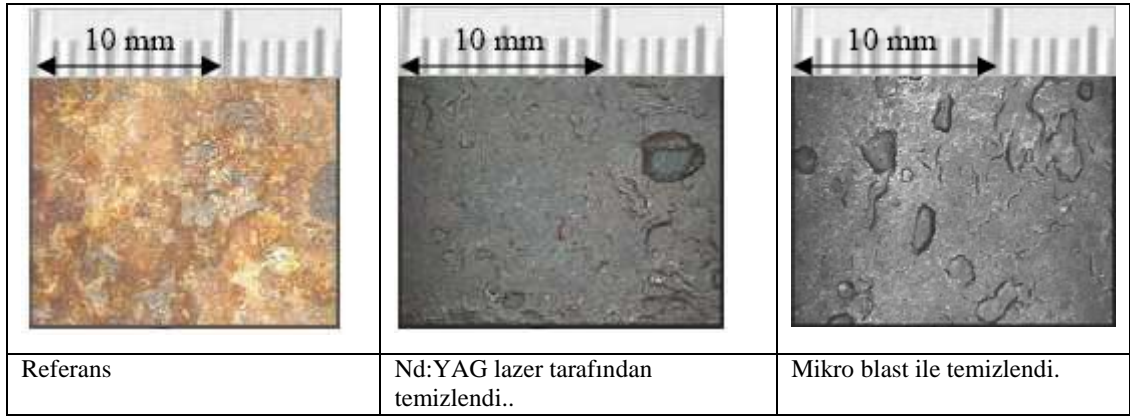
Kullanılan lazerler Nd:YAG, CO₂ ve HPDL' dir [50].

1. Nd:YAG lazer yüzeyi kaplanmış çeliklerin temizlenmesinde, TEA CO₂ 'den çok daha verimlidir.
2. Kaplanmış ıslak yüzeyler kuru yüzeylere göre daha hızlı temizlenirler.
3. Polimer malzemelerin yüzeylerinin temizlenmesinde TEA CO₂ Lazer Nd:YAG Lazer'den daha verimlidir.
4. Çift frekanslı (Yeşil) Nd:YAG lazer ışını bakır oksitlerini temizleyemez.

Lazer ile temizlenmenin avantajları:

- İstenilen alan temizlenebilir.
- Çok hassas parçalar kusursuz bir şekilde temizlenebilir.
- Malzeme üzerindeki etkisi kontrol edilebilir.
- Temizlenmesi çok zor olan pislikler temizlenebilir.

- Ana malzemenin üzerinde en küçük ısıl etkisi vardır.
- Devamlı bir şekilde temizleme işlemi kontrol edilebilir.
- Lazer ile temizlemenin çevreye karşı bir etkisi yoktur.
- Temizleme sırasında kimyasallar kullanılmaz.
- Temizleme sırasında kalan pislikler çok kolay şekilde toplanabilir.
- Çok az bir bölgede iş güvenliği sağlanabilir.
- Yangına veya patlamaya katkısı çok azdır.
- Çalışanlar kimyasal bir olaya sebebiyet vermez.



Şekil II.31 Lazer Temizleme Uygulaması

Kirlenmiş yüzeylerin temizlenmesi uygulamaları:

- Pompa linings.
- Pas ve kirlenmeden oluşmuş katmanlar.
- Yağ ve gres.
- Toz ve tortular.
- Oksitlenmiş katmanlar.
- Gemilerde tuzların oluşturduğu etkiler.
- Mikroskobik toz parçaları.
- Kalıp yüzeyleri.
- Kaynak dikiş yerleri.
- Optik malzemelerden yapılmış yüzeylerin temizlenmesi [47].
- Mikro ve nano devre uygulamaları temizlik işlemlerinde [48].
- Katı yüzeylerin üzerindeki nano parçacıkların temizlenmesinde [49].

Uygulama yapılmış yüzeylerin temizlenmesi

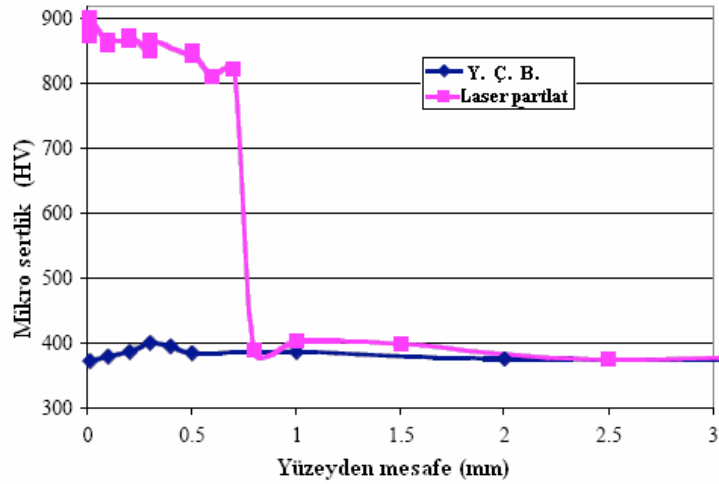
- Boyalar.
- Duvar yazıları.

- Yapışkanlar .
- Reçineler (Epoxy resin).
- Koruyucu kaplamalar.
- Çok büyük işlem yapılmış nesnelere. Örneğin gemi veya köprü yüzeylerinin temizlenmesi.

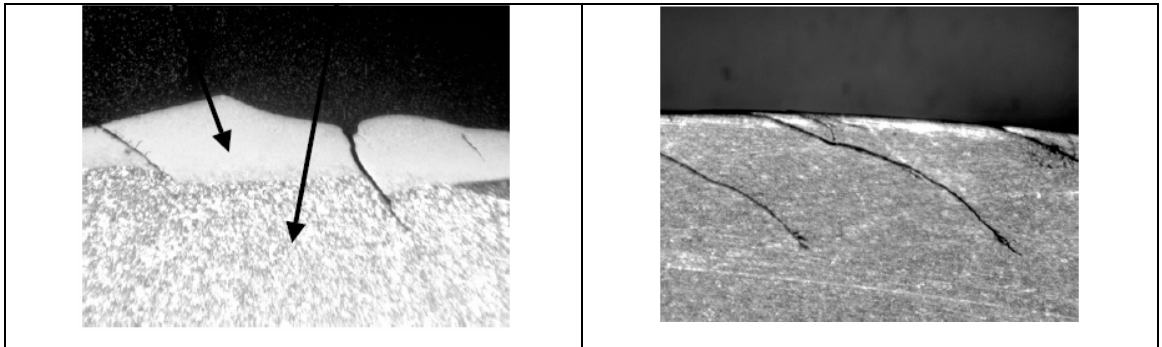
II. 6. 2. 8. Lazerle Yüzey Parlatma

Lazerle yüzey parlatma işlemleri; malzemenin yüzeyi eritilerek veya buharlaştırılarak yapılmaktadır [53].

Örneğin demir yollarında kullanılan çelik rayların lazer ile parlatılması sonucunda; tren rayları ile tekerlekler arasındaki sürtünme % 40 azalır ve % 75 'e kadar çatlaklarda azalma olabilmektedir. Bu sürtünme ve çatlaklardaki azalma maliyet yönünden, yakıttan 40 milyon \$ ve rayların onarılmasından 16 milyon \$ kazanç sağlamaktadır. Trenin raydan çıkma problemi azalmaktadır [55]. Lazerle parlatma sürtünme ve aşınmanın az olması istenilen yerlerde uygulanmaktadır. Dişli, yatak ve çelik yüzeylerine uygulanmaktadır [55].



Şekil II.32 Parlatılmış Yüzeyin Sertliği



Şekil II.33 Yüzeyden 1 mm Parlatılmış

Şekil II.34 Parlatılmamış Ana Malzeme

3D parçaların elle polisajın dezavantajları:

- Zamana göre verimi
- Yüksek maliyet
- Düşük tekrarlanma verimliliği

Lazer ile polisaj:

- Otomasyonda polisaj yapılabilmesi
- Kimyasal kullanılmaması
- Elle polisaj olmaması
- Yüksek verimlilik
- Yüzey kalitesi

Lazer ile polisaj:

- Bir veya iki işlem ile polisaj yapılmaktadır
- Malzemenin yüzeyi eritilerek
- Düzgün bir yüzeyde polisaj için eriyen katman 10 – 100 µm arasındadır
- Malzemenin yüzeyi buharlaştırılarak veya kaldırılarak
- Yüzeyin erimesinden sonra yüzey buharlaşmaktadır.

Lazer polisaj:

- Çelik malzemeler, polisaj için eriyen yüzeyler sonra sertleşebilmektedir.
- Yüzeyin görünümü mattır.
- Yüzeyin kalitesi en çok malzemeye bağlıdır.

II. 6. 2. 9. Lazer Yardımıyla Şekil Verme

Metalik malzemelere Lazer yardımıyla şekil verilebilmektedir. Gemi endüstrisinde büyük sacların bükülmesi için elle kullanılan alevli ısıtıcı da benzer işlemi yapmaktadır [58].

İnce sac parçaları üzerinde lokal bir bölgeye odaklanmış lazer ışının uygulanmasıyla şekil verilmektedir. Lokal enerjiye maruz kalan bölgede eşit olmayan sıcaklık dağılımından termal gerilmeler, deformasyonlar ve burulmalar ortaya çıkmaktadır.

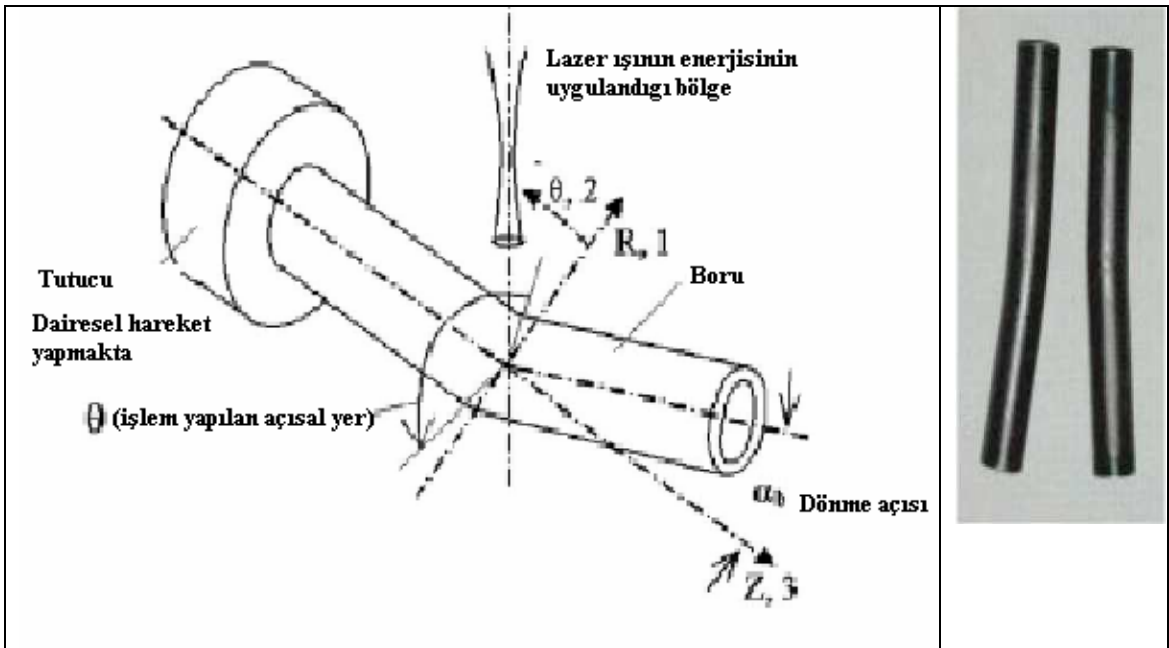
Kontrol edilebilen parametreler:

- Lazerin hareket hızı
- Lazerin gücü
- Lazer ışının genişliği

- Hareket geometrisi
- Balgama metodu

Lazerle şekil vermede; şekil vermek için dışarıdan herhangi bir kuvvet uygulanmasına gerek yoktur. Şekil verme sırasında herhangi bir takım kullanılmadığından şekil verilen parçaların hepsi aynı ölçüde olmaktadır. Bu özelliğiyle diğer şekil verme metotlarından farklıdır. İstenilen açılarda şekil verilebilir. Geleneksel metotlarda farklı geometrik şekiller için farklı takımlar kullanılmaktadır. Lazer ile şekil vermede farklı geometriler için lazer ; farklı geometrik yönlerde değiştirilerek yapılır.

Lazer ile boru parçalarında bükme işlemi yapılmaktadır. Şekil II.35'te gösterilmektedir [56, 57].



Şekil II.35 Boru Bükme Şematik Resmi Ve Örnek Parça



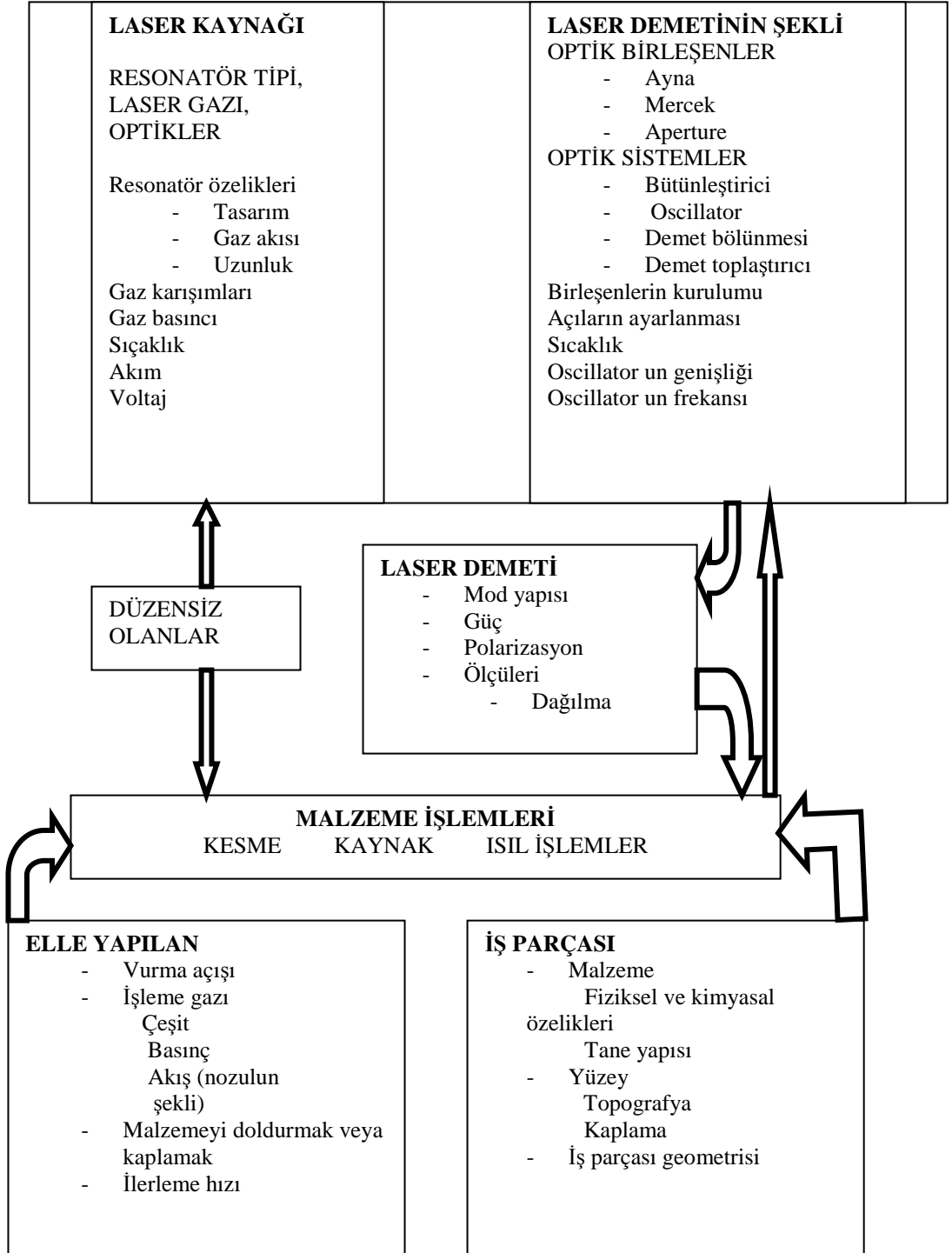
Şekil II.36 Lazerle Şekil Verilmiş Şekiller Ve Lazer Şekil Verme Makinesi

Lazer ile farklı geometrik şekiller verilebilir. Şekil II.36 'de gösterilmektedir [59].

II. 7. LASER İLE İŞLEME PARAMETRELERİ

Malzemelere uygulanan işlemlerde istenilen kalitenin elde edilebilmesi için bir çok parametrenin optimize edilmesi gerekir. Lazer makinesi için işlem parametreleri Tablo II.9 ' da verilmiştir.

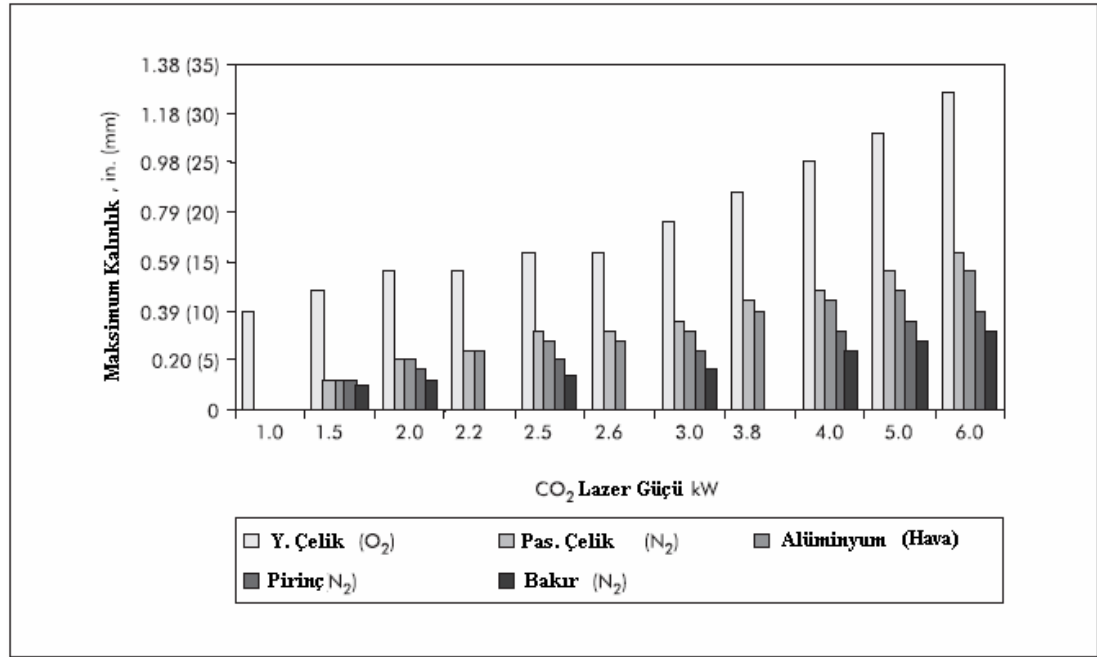
Tablo II.9 Lazer İle İşleme Parametreleri



II. 7. 1. Lazer Parametreleri

II. 7. 1.1. Lazer Işını'nın Gücü

Lazer demetinin gücü, malzeme tiplerine ve iş parçasının kalınlığına göre ayarlanmalıdır [16].



Şekil II.37 Lazer Güçleri Ve Kesilecek Malzeme Kalınlıkları

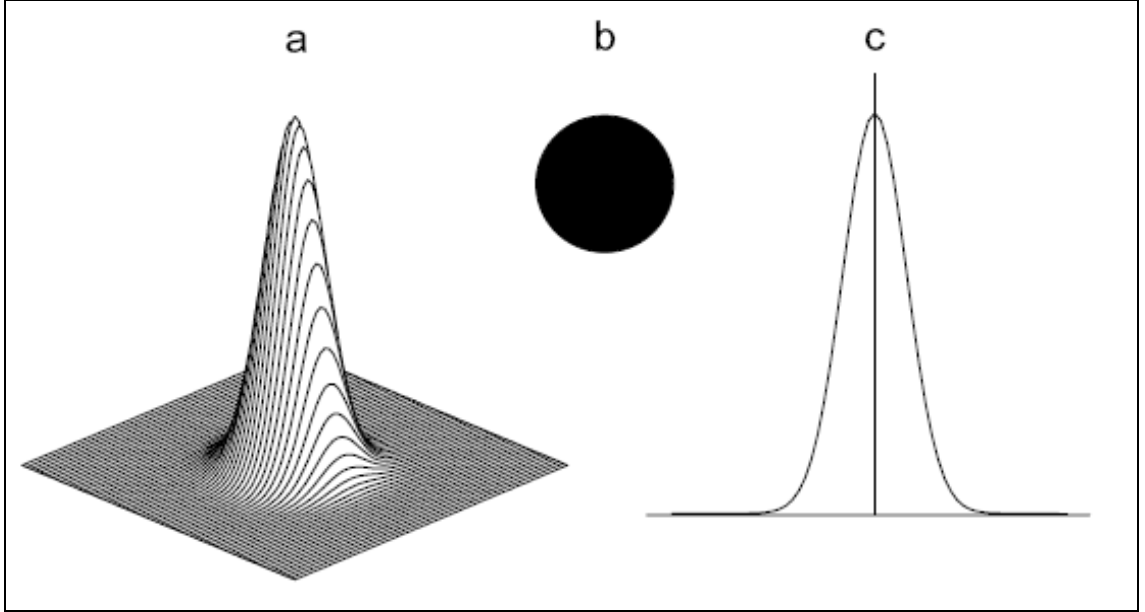
Kesilebilecek malzeme kalınlığı: Lazer tipine ve gücüne bağlıdır. Şekil II.37'de alüminyum , bakır , pirinç, paslanmaz çelik ve yapı çeliğine bağlı olarak kesilebileceği malzeme kalınlığı ve gerekli lazer gücü görülmektedir [4].

Lazer ışınının gücü kontrol ünitesi panelinden % ve W olarak ayarlanabilir. Ayrıca lazer kafasına takılabilen güç potansiyometresi ile gerçekleştirilebilir. Görüldüğü gibi en kalın paslanmaz çelik en güçlü lazer ile kesilir.

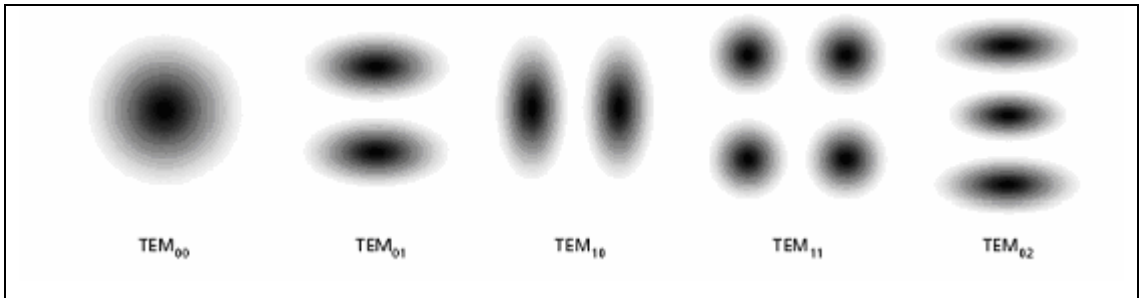
II. 7. 1.2. Güç Yoğunluk Dağılımı

Genel olarak, Gaus eğrisine TEM₀₀ (Transverse Electromagnetic Mode) benzeyen güç yoğunluk dağılımı en iyi kesim sonuçlarının elde edilmesini sağlar. Lazer ile kaynakta TEM₀₀ mod ve multi mod kullanılmaktadır. Şekil II.38 'de gösterilmektedir [16].

Ayrıca TEM_{nm} buradaki, n yataydaki yönü, m dikeydeki yönü temsil etmektedir. Çok fazla TEM modları vardır. Şekil II.39'da farklı modların olması lazerin farklı uygulamalarda kullanılmasından dolayıdır. Örneğin lazerle malzemelerin kaynağında multi mod kullanılmaktadır [16,61].



Şekil II.38 TEM 00 Şematik Şekli Modu a) 3D Görünüşü b) Yatay Kesiti (% 85 Yüzey) c) Kesit Eğrisi



Şekil II.39 Farklı TEM Modları

II. 7. 1.3. Güç Kaynağı Dengesi

Tüm yüzeylerde aynı sonuçların elde edilmesi kesim sırasında lazer gücünün sabit kalmasıyla sağlanır[62].

Lazer üreticisine enerji verildikten 5 – 10 dakika sonra sabit bir çıkış enerji elde edilebilir.

Lazer ışınının gücünün sabit kalması aynı zamanda sıcaklığa ve gaz basıncına bağlıdır [16].

Lazer gücünün sabit bir değerde kalması ve kesim sırasında gücün düşmemesi sağlanmalıdır.

Belli bir zaman sonra lazer gücünde zayıflama görülür. Bunun için lazer çıkış gücünün belli aralıklarda kontrol edilmesi gerekmektedir [16].

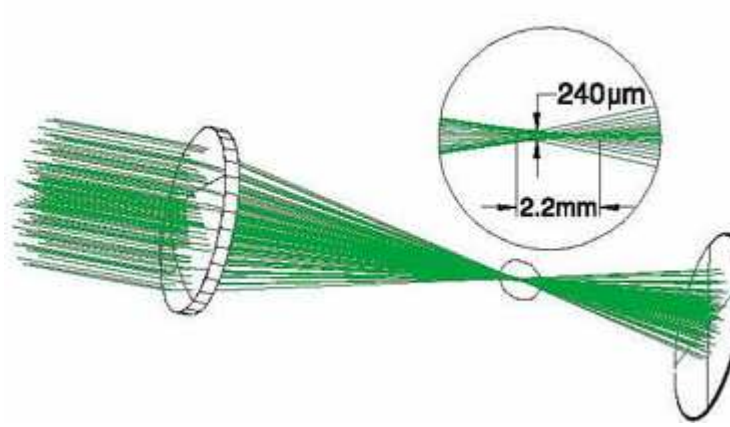
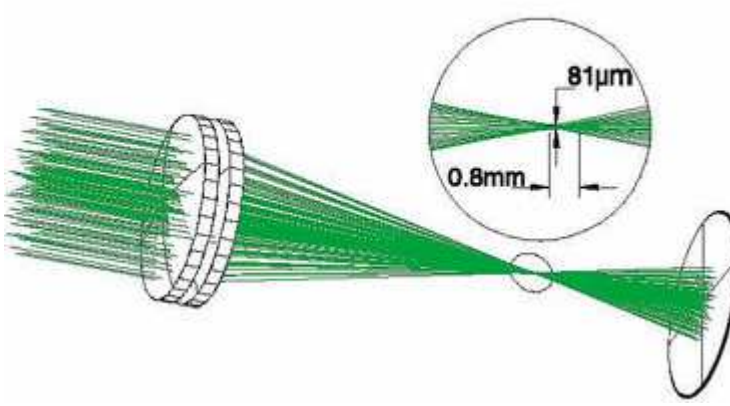
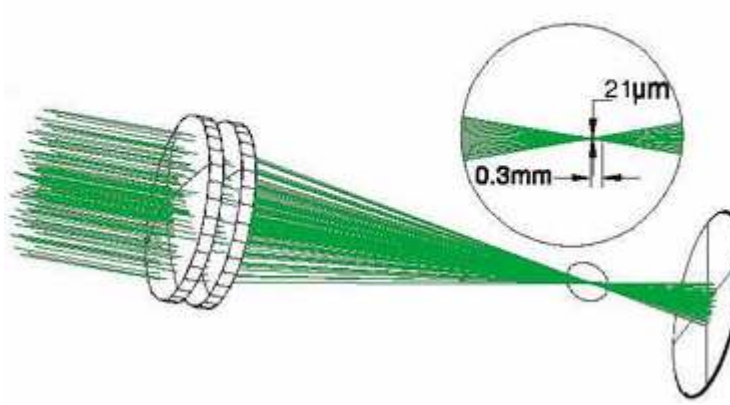
Lazer gücündeki azalmanın nedenleri:

- Jeneratör valfların arızalanması
- Optik sistemlerin arızalanması
- Soğutma suyunun kalitesi

II. 7. 1.4. Lazer Işınının Odaklaması

Lazer ışınının odaklaması; çapı ne kadar büyük olursa , elde edilen odaklama çapı o kadar küçülür ve böylece kesim aralığı o kadar dar olur [16].

Elde edilen odaklama çapı; ışının dalga boyuna, merceklerin tiplerine, ışın odak noktalarına, gelen ışının çapına ve ışının kalitesine TEM₀₀ bağlıdır. Şekil II.40 'ta gelen ışının çapı aynı olarak alınıp farklı mercekler ve birden fazla mercek aynı anda kullanılarak lazer ışınının odaklaması gösterilmiştir [63,64].

	<p>a) Odaklamada fakir performans 240 μm</p> <p>Tek Mercek $f = 50 \text{ mm}$</p> <p>Plano – Dışbükey Mercek</p>
	<p>b) Odaklamada iyi performans 81 μm</p> <p>Çift Mercek $f = 100 \text{ mm}$</p> <p>Plano – Dışbükey Mercek</p>
	<p>c) Odaklamada mükemmel performans 21 μm</p> <p>Tek $f = 100 \text{ mm}$</p> <p>Plano – Dışbükey Mercek & Tek $f = 100 \text{ mm}$</p> <p>Meniscus Mercek</p>

Şekil II.40 Şekil Odaklama Çapının Değişimi

II. 7. 1.5. Sapma Açısı (Divergence)

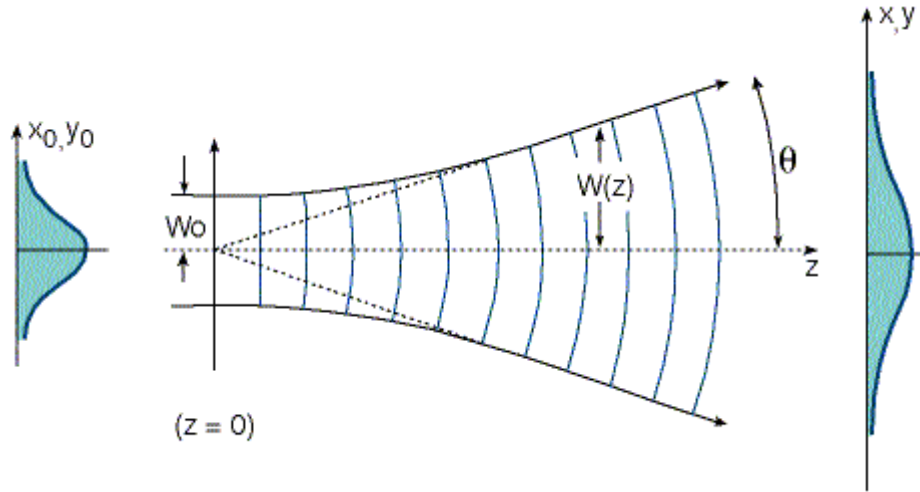
Özellikle iş parçasının sabit, optik elemanlarının hareketli olduğu lazer sistemlerinde sapma açısı çok önemli bir faktördür.

Mercekten geçirilen lazer ışını konik halinde yayınır. Lazer ışın demetinin sınıрыyla merkez arasındaki açı, sapma açısı (divergence) olarak adlandırılır [16].

Işın çapının ve ışın özelliklerinin sabit kalması için sapma açısının mümkün olduğu kadar küçük olması gerekmektedir. Optik elemanların sabit, iş parçasının hareketli olduğu sistemlerde, ışının sapma açısından kaynaklanabilecek bir problem görülmez.

Şekil II.41 'te görüldüğü gibi $X_0 Y_0$ da lazer TEM 00 da Gaus eğrisi şeklindedir. Fakat ışının herhangi bir Z uzaklığında eğri bozulmaktadır [65].

Işığın kat edeceği yol uzadıkça ışık saçılımı artmaktadır. Bunu önlemek için ek odaklayıcı ve doğrultucu elemanlar kullanılmaktadır (NC ayarlı, eksen ortasında ek aynalı isin sabitleme yada konkavlığı NC ile ayarlanabilir özel aynalar kullanılmaktadır). Bunlar sonuç olarak; ek maliyet, periyodik bakım-değişim ve servis maliyeti gerektirmektedir. Bu hareketlerin yüksek hızlı kesimlerde, sürekli olarak gerçekleştirileceği göz önünde bulundurulacak olursa; Lazer Işığı'nın kat edeceği yolun mümkün olduğunca kısa, lazer kesim kafasının da olabildiğince az hareketli olması önem taşır [66].



Şekil II.41 Sapma Açısı

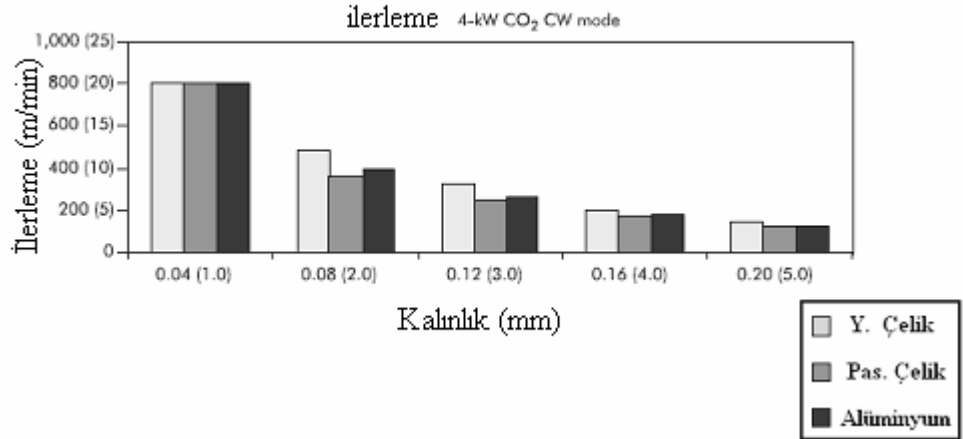
II. 7. 1.6. Polarizasyon

Polarizasyon kesim sırasında, dairesel polarize olmuş lazer demetine ihtiyaç vardır. Çizgisel veya eliptik polarizasyon, kesme hattında hatalara ve kesme hattının dikliğinin bozulmasına neden olur. Özellikle kapalı hatların kesiminde, polarizasyon sorunu nedeniyle başlangıç ve bitiş yerleri arasında malzemenin üst yüzeyinin çakıştığı fakat alt yüzeyinin çakışmadığı gözlenir [16].

II. 7. 2. İşlem Parametreleri

II. 7. 2.1. Kesme Hızı

Kesme hızı, malzemenin tipine ve kalınlığına bağlıdır. Kesme hızının gerektiğinden daha fazla veya daha az olması: Kesme hattında pürüzlülük, cüruf birikmesi ve yanma gibi istenmeyen durumların doğmasına neden olur. Genel olarak malzeme kalınlığı artıkça kesme hızı düşmektedir. Şekil II.42 ' de gösterilmiştir [16].



Şekil II.42 4-kW CO₂, CW Lazer Kesme İşlemlerinde İlerleme ve Malzeme Kalınlığı Arasındaki İlişki.

II. 7. 2.2. Kesme Gazı Tipi

Lazer ile kesim yönteminde kullanılan gazlar; Oksijen (O₂), Azot (N₂), Argon (Ar) ve Helyum (He) 'dur. Kesilecek malzeme ve kullanılacak lazer gücüne bağlı olarak kullanılacak lazer kesim yöntemleri: Yakarak kesme, eriterek kesme ve süblimleştirmeye kesimdir. Malzemenin özelliği ve istenilen kesme sonuçları, kullanılacak gazın tipini tayin etmektedir [30].

Yakarak kesme yönteminde kesme gazı olarak oksijen kullanılır. Lazer demeti etkisi ve oksijen gazı altında yanabilen metallerin hepsi bu kesim tipine uymaktadır. Bu malzemeler özellikle yapı çelikleri ve paslanmaz çelikleridir. Ahşap gibi tutuşabilen malzemelerle kesim hattında oksitlenme istenmeyen malzemelerin kesiminde oksijen gazı kullanılmaz.

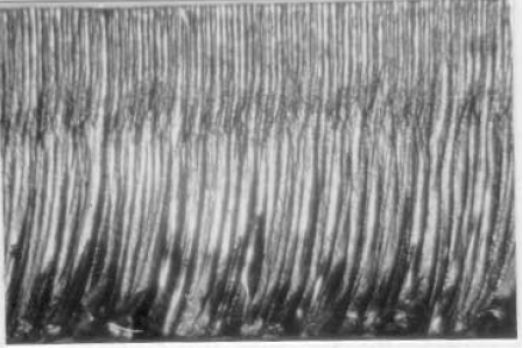
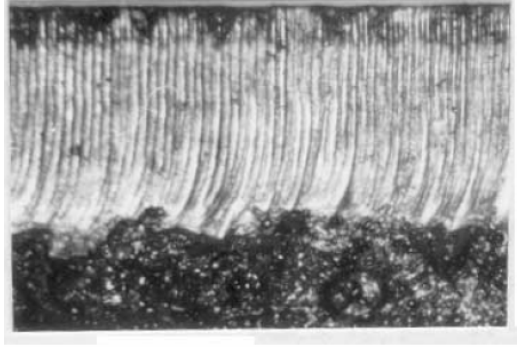
Yakarak kesim yöntemine uymayan malzemeler eritilerek kesilir. Bu yöntemde kesme gazı olarak Azot (N_2) kullanılır.

Süblimleşme kesimindeyse Azot gazı veya Argon gazı kullanılır. Bu yöntem ahşap, plastik, kauçuk ve ince folyoların kesilmesinde kullanılır. Kesme gazının görevi; malzeme partiküllerinin oksijenle reaksiyona girerek tutuşmasını önlemektir.

Ayrıca kesim sonuçlarının istenilen düzeyde elde edilebilmesi için gazın saflığının yüksek olması gerekir. Lazer ile kesim sırasında kullanılan gazlardan istenilen saflık derecesi en az % 99.95 tir [10].

II. 7. 2.3. Gaz Basıncı

Gaz basıncı kesilecek malzemenin kalınlığına uygun olarak seçilmelidir. Genel olarak ince malzemelerin kesimi için gerekli gaz basıncı, kalın malzemeler için gerekli basınçtan daha fazladır [67].

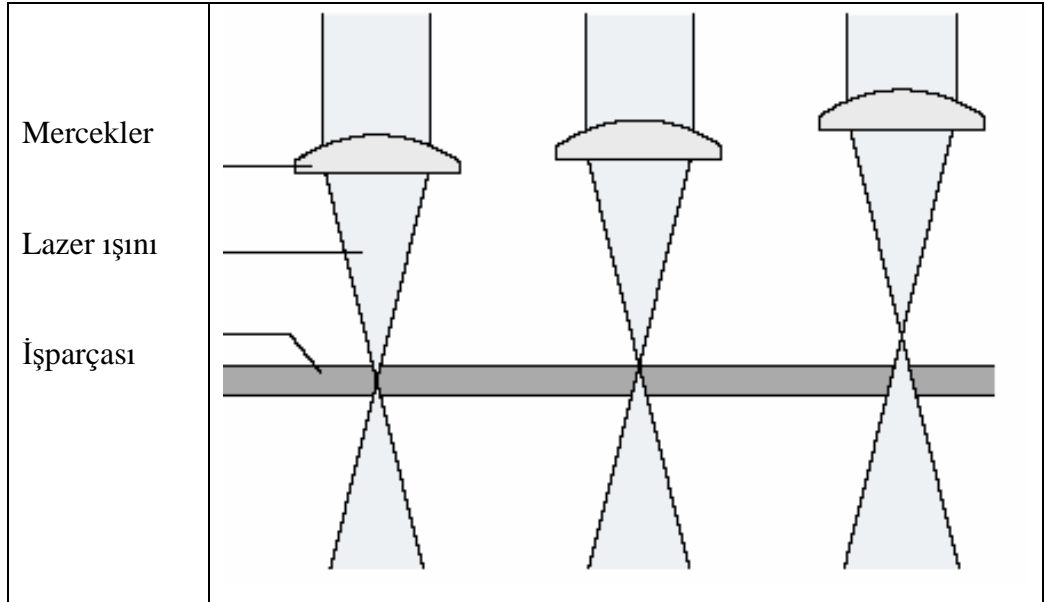
	
Şekil II.43 A) 10 mm Yumuşak Çelik İlerleme 300 mm/min, Basıncı 1 Bar;	(B) 10 mm Yumuşak İlerleme 300 mm/min, Basıncı 3 Bar.

II. 7. 2.4. Odaklama Noktası

Odaklama noktası; iyi kesim sonuçlarının elde edilebilmesi için malzeme kalınlığına göre odaklama noktasının, olması gereken lokasyonunun bilinmesi gerekmektedir.

Yapı çeliklerinin kesiminde odaklama noktası olarak şu kurala uyulur[68].

- 6 mm kalınlığa kadar olan malzemelerin kesiminde odaklama noktası malzemenin üst yüzeyinden alınır.
- 8 mm ve üstündeki kalınlığa sahip malzemelerin kesiminde, odaklama noktası, malzemenin üst yüzeyinin yukarısında alınır. Şekil II.44 ' te gösterilmektedir.



Şekil II.44 Odaklama Noktası Pozisyonları

II. 7. 3. İş Parçası Parametreleri

II. 7. 3.1. İş Parçası Kalınlığı

İş parçası kalınlığı arttıkça gerekli olan lazer gücünde artmaktadır. Ayrıca artan malzeme kalınlığı ile birlikte kesme hızı düşmektedir [16].

II. 7. 3.2. Malzemelerin Özellikleri

Eenerji soğurma, ısı iletkenliği, yansıtma potansiyelleri vs. malzemenin lazer ışını ile işlenebilme özelliklerini belirlemektedir.

Demir ve çeliklerin kesiminde; malzemenin karbon yüzdesi artıkça kesme hattı boyunca malzemenin sertleşme özelliği de artar. Kesme gazı olarak oksijen kullanılır. Kesme hatlarının kalitesi oldukça iyidir. Dar hatlarda ve keskin köşelerde yanma olayı görülebilir.

Paslanmaz çelikler 6 mm kalınlığa kadar sürekli modda (**Continuous Wave**) kesilirken daha kalın malzemeler puls modda (**Pulse Mode**) ve düşük hızda kesilebilir. Bunun amacı, kesme hattında aşırı ısınmadan dolayı oluşabilecek sorunları önlemektir.

Alüminyum alaşımlar gibi demir olmayan , yüksek yansıtma ve ısı iletkenliğine sahip malzemeler ancak 6 mm kalınlığa kadar kesilebilir [16].

Saf alüminyum çok yüksek yansıtma özelliğine sahip olduğu için ancak 4 mm kalınlığa kadar lazer ile kesilebilir. Alüminyum ve alaşımlarının kesimi için yüksek basınç yöntemi ve azot gazı kullanılır [16].

Pirinç ve bakır yüksek yansıtma ve ısıl iletkenliğinden dolayı 3mm kalınlığına kadar kesilmektedir. Bakırın kesilmesinde sadece oksijen gazı kullanılır. Azot gazının kullanılması yansımaya neden olup optik ekipmanların kullanılmasına sebebiyet vermektedir.

Pirinç: Yüksek basınç kesim yöntemiyle, hem oksijen hem de azot ile kesilebilir. Oksijen ile yapılan kesimler daha iyi sonuç verir.

II. 7. 3.3. İş Parçası Yüzeyi

İş parçası yüzeyi, Alüminyum gibi yüzeyi parlak malzemelerin yüksek yansıtma nedeniyle kesilebilme özellikleri oldukça kötüdür. Parlak yüzey üzerine yapılabilecek bir kaplama(etiketleme, vernik, boyama, kaplama vs.) ile malzemenin yüzeyi yansıtma yapılarak kesim sonuçlarının iyileştirilmesi büyük rol oynar [16].

Sac malzemelerinin üzerindeki yağ filmi sebebiyle kesme kalitesinde herhangi bir bozulma meydana gelmemektedir.

Malzeme üzerindeki pas tabakası oksijen birikmesine yol açarak enerji birikmesine sebep olur. Bunun sonucunda yanma ve pitting olayları ortaya çıkar.

II. 7. 3.4. İş Parçasının Geometrisi

İş parçasının yüzeyindeki homojensizlik veya küçük çukurluklar kesim sırasında sorun yaratabilir. Böyle bir durumda aşağıdaki parametrelerde değişiklik yapılmalıdır [16].

- Lazer gücünün azaltılması
- Kesme hızının azaltılması

II. 7. 4. Makine Parametreleri

II. 7. 4. 1. Lazer Demetinin Çıkış Aynası,

Lazer demetinin çıkış aynası, kirlenmiş aynalar lazer gücünü absorbe etmektedir. Buda lazer demetinin zamana bağlı olarak soğuması ve ısınmasına , lazer demetinin küçük zaman dilimleri içinde kesilmesine neden olur. Lazer demetindeki bu kesintiler; sapma açısının ve dolayısıyla ışın odaklamasının değişmesine ayrıca odaklama merceğinin termal olarak zorlanmasına ve mercek üzerindeki kaplama malzemesinin bozulmasına neden olur[30].

II. 7. 4. 2. Işın Ayarı

Kesim sırasında lazer demetinin kesme yüzeyine dik, doğrultusuna paralel ve merkez ayarının yerinde olması istenir. Özellikle kesim ekipmanları hareketli olan sistemlerde bu önemli bir faktördür. Yüksek hassas ayar ve rutin kontrol gerekmektedir[16].

II. 7. 4. 3. Işın Yönlendirme Aynaları

Işın yönlendirme aynalarının kirli olması kesim kalitesine olumsuz yönde etki etmektedir. Aynaların kirli olması şu sonuçlara sebep olur:

- Çapaklanma
- Pürüzlülüğün artması
- Yapı çeliklerinde küçük kraterlerin oluşması
- Çok büyük kazalara sebebiyet verebilir

II. 7. 4. 4. Odaklama Mercekleri

Odaklama merceklerinin kirlenmesi, ısı absorblama olayını arttırır ve odaklama noktasının yerinin değişmesine neden olur. Bunun sonunda şu problemlerle karşılaşılır:

- Kesim apaksız başlar. Fakat bir süre sonra kesim boyu uzadıkça apak oluşmaya başlar ve giderek şiddetlenir.
- Kesme yarığı aralığı artar ve buna paralel olarak pürüzlülük değerleri artar.
- Yapı eliklerinin kesiminde küçük kraterler oluşur.
- Aşırı durumlarda ise uygun kesim gerçekleşmez.

Merceklerin yanlış takılması ise kesme işlemini engeller.

II. 7. 4. 5. Lazer Işını İle Nozul Deliğinin Merkezlenmesi

İyi kesim sonuçlarının elde edilebilmesi için; lazer demetinin nozul deliğine merkezlenmesi gerekir. Aksi takdirde lazer demetin bakır nozula temas etmesi; nozulun ısınıp hasar görmesine ve uygun işın kalitesinin elde edilmemesine sebep olur [16].

Lazer işını, nozul deliği merkezinden +/- 0.05 mm ‘den fazla kaık olmamalıdır.

II. 7. 4. 6. Nozul Delik apı

Kesim yöntemine uygun delik çapına sahip nozulun seçilmesi önemlidir. Yüksek basınç ile kesim yönteminde kullanılan nozul delik çapı, standart kesimde kullanılanıdan daha büyüktür. Nozul delik çapı, kesme gazı sarfiyatının en alt düzeyde tutunabilmesi için mümkün olduğu kadar küçük seçilmelidir [67].

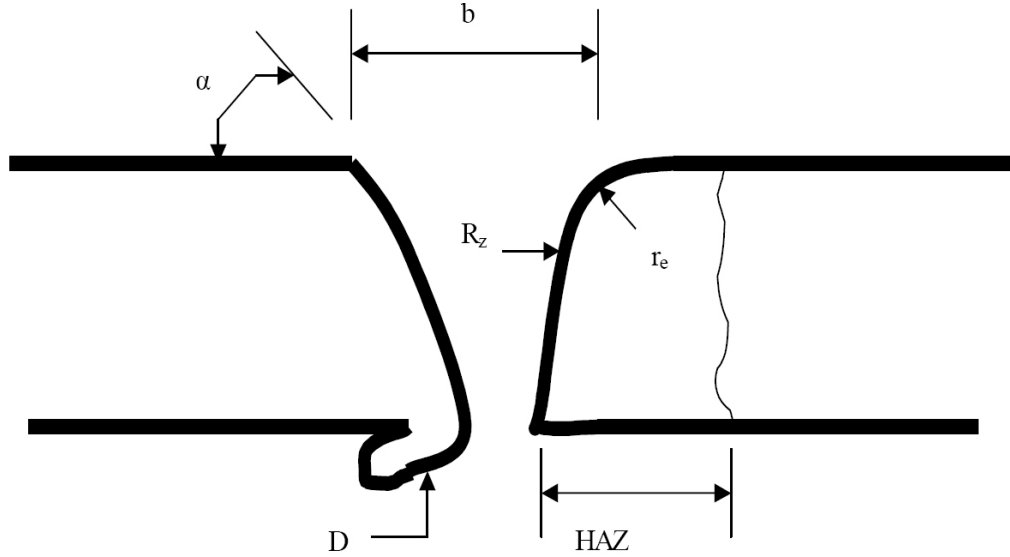
II. 7. 5. Lazer Kesim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Lazer kesim yüzeylerinin kalitesi birkaç yöntem sonuçları ile açıklanabilir.

- Kerf genişliği
- Yüzey kalitesi
- Cüruf sekli
- Isıdan etkilenen bölge (HAZ)
- Kesim izgileri
- Kesim yerinin dikliği

Sonuçlar DIN 2310-5 "Laser cutting of metallic materials" standardına göre değerlendirilir. DIN 2310-4 (Plasma Cutting) standardı Plazma Kesim’dir [19].

ISO 9013 terimlerin tanımlarını vermektedir ve kesim yüzeylerinin kalitesi, tolerans ölçüleri, kalite sınıflandırılması değerlendirilmesi tanımlanmaktadır. 0.5 mm'den 40mm kalınlığa kadar olan malzemelerin laser ile kesiminin uygulamasıdır [68].



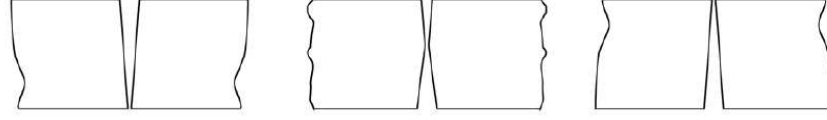
b: Kerf genişliği R_z : Yüzey kalitesi D: Cüruf sekli
 r_e : kesim kösesi dikliği α : kesme hattı çizgileri HAZ: Isıdan etkilenen bölge

Şekil II.45 Lazer Kesim Yüzeylerinin Kalite Kriterleri [19]

II. 7. 5. 1 Kerf Genişliği

Kerf: lazer demeti malzemeyi kestiği zaman meydana gelen kesim yerinin genişliğine kerf denir. Bu kerf genişliğinde malzemenin üst tarafı alt tarafından daha fazla olmaktadır. Ölçme sonuçları mm olmaktadır. Birkaç mm kalınlıktaki malzemelerin kerf genişliği 0.15 mm, malzeme kalınlığı artıkça 0.20 mm den 0.50 mm kadar çıkabilmektedir. Ölçümünde mastarlar kullanılmaktadır. Farklı ölçüm aletleri kullanılabilir [68,70].

Malzemenin yapısına göre kerf geometrileri farklı olabilmektedir. Şekil II.46'da görüldüğü gibi aynı kalınlıktaki farklı malzemelerde kerf genişlikleri farklı olmaktadır [16].



Şekil II.46. Çeşitli Kerf Şekilleri

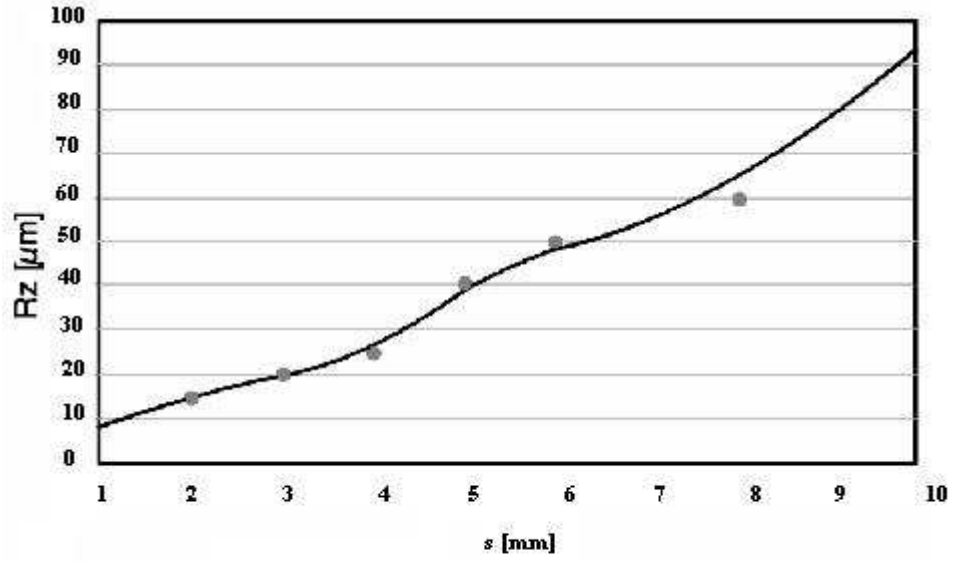
Tablo II.10. TRUMPF Standart Kerf Değerleri

Malzeme	Malzeme Kalınlığı [mm]	Kerf [mm]
Yapı çeliği St 37	1-3	0.15
	4-6	0.2 – 0.3
	-15	0.35 – 0.4
	20	0.5
Paslanmaz çelik (1.4301) N ₂ gazı ile yüksek basınçlı kesim	1 – 3	0.15
	4 – 8	0.2
	10 – 12	0.5
Alüminyum alaşımları (AlMg ₃ , AlMgSi ₁), N ₂ gazı ile yüksek basınçlı kesim	1 -3	0.15
	4 - 8	0.2 – 0.3

II. 7. 5. 2. Yüzey Kalitesi

Yüzey Kalitesi: Kesim yüzeyi üzerinden farklı bölgelerden alınan pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

ISO 9013 standardına göre; 2 mm ve daha ince metal malzemelerin pürüzlülüğü kesim hattının tam yarısındaki mesafe üzerinden alınır. Daha kalın iş parçasında pürüzlülük değerleri, üst yüzeyden kalınlığın 2/3 'ü kadar olan mesafeden alınır [69]. Pürüzlülük değeri malzemenin kalınlığı artıkça artmaktadır. Şekil II.47'de gösterilmektedir [68].



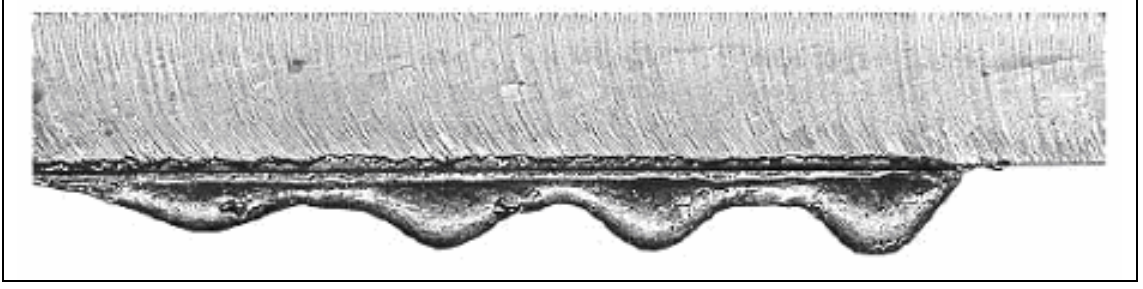
Şekil II.47 Malzemenin Kalınlığı ile Yüzey Kalitesi Arındaki İlişki

Pürüzlülük değerleri artıran sebepler şunlardır:

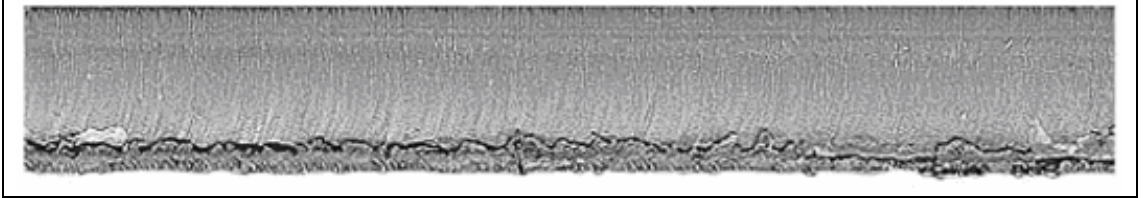
- Yanlış gaz basıncının seçilmesi
- Yanlış kesme hızının seçilmesi
- Yanlış lazer gücünün seçilmesi

II. 7. 5. 3. Cüruf Şekli

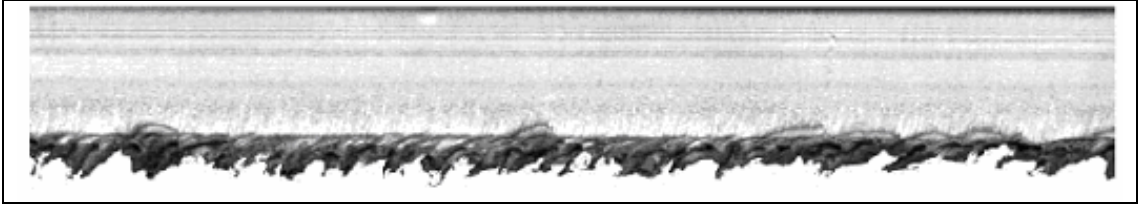
Kesim sırasında eriyen malzemenin bu bölgeden uzaklaştırılması gerekir. Bunu değerlendirirken bir ölçme metodu yoktur. Sadece görsel olarak değerlendirme yapılmaktadır. Lazer odaklama noktasının ayar ölçüsünden ve diğer ayarlardan kaynaklanır. Şekil II.48'de gösterildiği gibi aynı kalınlıktaki malzemelerin farklı odaklanma sonuçlarında farklı cüruflar olmaktadır [16,68].



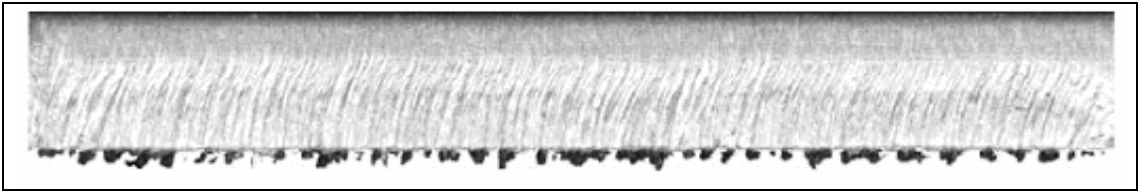
Damla şeklindeki cüruf, yapı çeliği, kalınlığı 15 mm, odaklama pozisyonu +5



Küçük kırıntılı, yapı çeliği, cüruf, kalınlığı 15 mm, odaklama pozisyonu -1



Keskin cüruf, paslanmaz çelik, kalınlığı 8 mm, odaklama pozisyonu -4



Keskin cüruf, paslanmaz çelik, kalınlığı 8 mm, odaklama pozisyonu -11

Şekil II.48 Aynı Kalınlıktaki Malzemelerin Farklı Odaklama Sonuçları

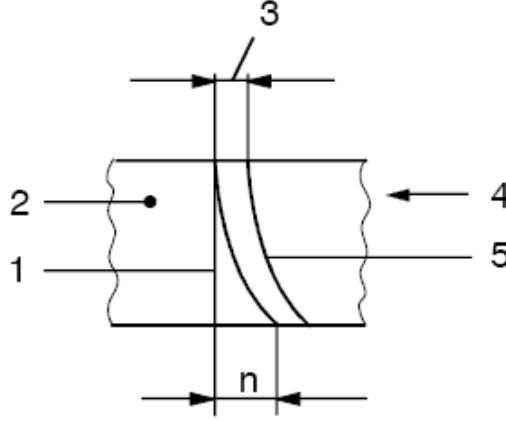
II. 7. 5. 4. Isıdan Etkilenen Bölge (HAZ)

Lazerle kesilen malzemelerde ısıdan etkilenen bölge (HAZ = Heat Affected Zone) oluşur. Bu bölge ısıdan dolayı deformasyona uğrayabilir ve yüzeylerde sertlik oluşturabilir [69].

II. 7. 5. 5. Kesim Çizgileri

Lazer iş parçasının kesiminde karakteristik çizgiler oluşur. Düşük kesme hızlarında kesim çizgileri lazer demetine paralele olmaktadır. Kesim hızı artınca kesim çizgileri kesme yönünden uzaklaşarak bükülmektedir.

Bir kesim çizgisinin ne kadar büküldüğü (n) ölçülebilir ve görsel olarak değerlendirilebilir [16,68].



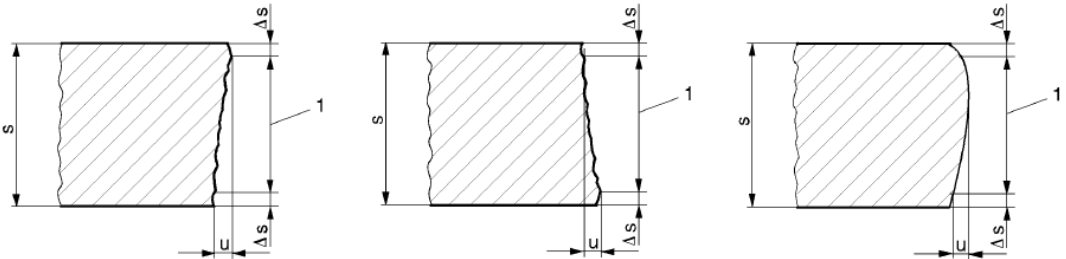
- 1 Referans çizgi
- 2 İş parçası
- 3 Yarıklık genişliği

- 4 Kesme yönü
- 5 Sürükleme Çizgileri
- n Arka yarıklık çizgisi

Şekil II.49 Kesim Çizgileri

II. 7. 5. 6. Kesim Yerinin Dikliği

Diklik ve eğim toleransı u harfiyle gösterilir. Teorik olarak kesim dikliği 90° olmalıdır. Kesme hattının alt , üst ve alt yüzeyleri arasındaki mesafe farkı olarak adlandırılır [16].



Şekil II.50 Kesim Yerinin Dikliği

BÖLÜM III

PLASTİK MALZEMELERİN (PTF ve POM) LAZER İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

III.1. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MATERYALLER

III.1.1. Kullanılan Lazer Kesme Makinesinin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Lazer teknolojilerin maliyeti hala çok yüksek olmasına rağmen ürün kalitesi oldukça iyi olduğu için kullanımını artmaktadır [75].

Kesme işleminde kullanılan Trumpf Trumatic L3030 makinenin özellikleri

Maksimum gücü: 3 kW

Maksimum kesilebileceği saç ölçüleri: 1500 x 3000 mm

Yapı çeliği: 0.8 mm den 20 mm e kadar

Alüminyum: 0.8 mm den 6 mm e kadar

Paslanmaz çeliği: 0.8 mm den 12 mm e kadar kesebilmektedir.

X eksenin uzunluğu: 1500 mm

Y eksenin uzunluğu: 3000 mm

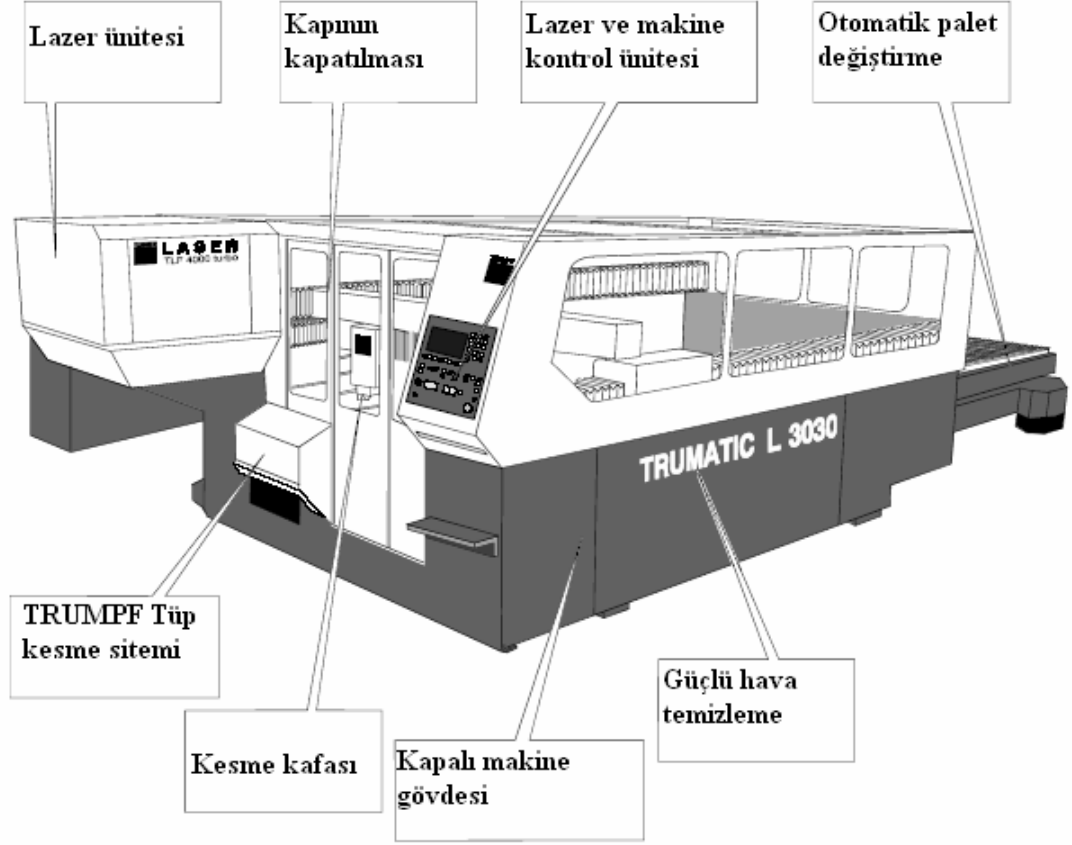
Kesme kafasının maksimum yüksekliği (Z eksen): 115 mm

Kontrol edilen eksenler: 3 eksen (X, Y, Z) ve 3 faz servo motorlar.

Maksimum pozisyon hareket hızı: paralel eksenlerde 60 m/min, aynı ekseninde 85 m/min

Makinenin toplam ağırlığı: 11500 kg

Kontrol: Bosch kontrol ünitesi.



Şekil III.1 Denede Kullanılan TRUMPF L3030 CNC Lazer Kesme Makinesi

III.1.2. Farklı Lazer Kesim Teknikleri

CO₂ türü lazerin dalga boyu 10,6 µm olduğu için organik malzemelerin birçoğunda yüzeyde yüksek emilmeme meydana getirmektedir. Fakat Nd: YAG lazerin dalga boyu 1.6 µm olduğu için yüzeyde parlama meydana getirmektedir. Yaklaşık olarak 500 W gücündeki CO₂ lazer malzemelerin kesilmesi için yeterli olabilmektedir. Mesela cam, plastik, seramik, kauçuk, odun, deri ve tekstil ürünlerini kesebilmektedir. Polimer malzemelerin hepsinin kesimi üç ana başlıkta toplanabilir. Bunlar fusion, buharlaştırma ve kimyasal indirgemedir. Plastik malzemelerin kesildiği zaman, bu üç yöntemle sınıflandırılması mümkün olmaktadır [75].

III.1.2.1. Fusion (Dağılma) Yöntemiyle Kesme

Termoplastik polimerlerin büyük bir kısmı malzemenin fusion özelliğinde kesilmektedir. Bu olay metalin inert gaz (helyum, neon, argon, kripton, xenon ve radon) ile kesimi ile benzer yol gösterir. Lazer demetinin erittiği malzeme gaz yardımıyla parçadan uzaklaştırılır. Böylece bütün malzemeyi istenilen parçalara ayırmak gücü elde edilir. Polimerlerde gaz olarak basınçlı hava kullanılmaktadır. Malzemenin kalınlıklarının değişimine bağlı olarak kerf genişliği 0,2 den 0,8 mm kadar

değişebilmektedir. Kesim kösesi ve yüzeylerde, düzgün makro yapı ve biraz izler vardır. Bu izler lazer ısın demetinin giriş ve çıkış noktalarında eriyen malzemenin neden olduğu izlerdir. PE, PP ve PC türü malzemeler fusion yöntemiyle kesilmektedir [75].

III.1.2.2. Buharlaştırma Yöntemiyle Kesme

Bu yöntemin en çok kullanıldığı polimer malzemesi PMMC (plexiglass) dır. Lazer ısın demeti tarafından polimer malzemesi tamamen buharlaştırılır. Kesme kalitesinin sonuçları mükemmeldir. Kesim köşelerinde ve yüzeylerinde eriyen malzemeden arta kalanı uzaklaştırmak mümkündür. Bunun için türbülanslı olmayan basınçlı hava ile kesilen yüzeylere yeterince kullanılmalıdır [75].

III.1.2.3. Kimyasal İndirgeme (Bozulma) Yöntemiyle Kesme

Kesme yüzeylerde ve köşelerin üzerinde genellikle karbon parçacıkları arta kalmaktadır. Aynı zamanda kesim sırasında duman meydana gelmektedir. Kimyasal indirgenme yöntemi termoset malzemelerin kesiminde kullanılmaktadır. Temel fusion yöntemiyle kıyaslandığı zaman yüksek güç kullanımı ihtiyacı vardır. Çünkü termoplastik deki monomerin doğrusal zincir yapısından dolayı ve üç boyutlu çapraz yapının kırılmasından dolayıdır. Bunda bize yüksek güç kullanımı sürpriz olmadığını göstermektedir.

- Termoset malzemelerin, termoplastik malzemeye kıyaslandığı zaman genellikle düşük ilerleme hızı vardır.
- Malzeme ile lazerin etkileşim noktasında, yüzeydeki meydana gelen sıcaklık 1000 ile 3000 °C arasında olmaktadır.

Uzaklaştırma işlemi sırasında eriyen metal kullanılmadığı için, kesilen yüzeyler düzgün ve pürüzsüzdür. Kesilen yüzey ince fakat yoğun karbonsu (siyah karbona benzer) toz katmanıyla kapatılabilir ve toz beziyle tekrar çıkarılabilir. Fakat başka polimerler için, normal kerf genişliği 0,2 – 0,8 mm arasında değişebilir ve kesilen yüzeyler numunenin yüzeyine yaklaşık olarak dik görünümündedir [75].

III.1.3. Kesilen Parçaların Boyutlarını Ölçmede Kullanılan Aletler

Kesilen parçaların ölçüleri TÜBİTAK' da bulunan cihazlarla yapılmıştır. Çap ölçüleri ZEISS Prismo 5 CMM cihazı kullanılarak touch - trigger prob yardımıyla yapılmıştır. Üçgen ve kare parçaların ölçümlerini daha hassas ve tahribatları da görebilmek amacıyla kenar boyutlarına uygun Jhonson masterları kenarlara dayatılarak fotoğrafları çekilmiş ve daha sonra ölçümler Clemex adlı metroloji yazılımı ile yapılmıştır.

III.1.4. Kesilen Plastik Malzemelerin Özellikleri

III.1.4.1. Teflon Malzemenin Özellikleri

Bir sanayi plastiği olan Teflon, flour atomları ile doymuş, uzun ve lineer bir karbon zincirinden oluşan molekül yapısı ve karbon ile flour atomları arasındaki çok kuvvetli bağlar nedeni ile, başka hiçbir plastikte bulunmayan üstün özelliklere sahiptir. Bütün sanayi plastikleri içinde en geniş çalışma aralığına (-260° C ile 270° C) sahip oluşu sanayide kullanılan bütün kimyasal maddelere, neme ve ortam şartlarına tam ve sonsuz dayanımı, bütün katılar içinde en düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip oluşu, üstün elektriksel yalıtım özelliği, yapışmazlık, yanmama ve bunun gibi özelliklerin yanı sıra, mekanik özelliklerin yeterli oluşu, teflonun bir çok kullanım alanında diğer malzemelere tercih edilmesine, çoğu durumda sadece Teflon kullanılabilmesine neden olmaktadır [71,72,73,74].

Tablo III.1 Teflon Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	TEST METODU	BİRİM	SAF TEFLON
ÖZGÜL AĞIRLIK	ASTM D 1457/18	g/cm ³	2,14-2,2
KULLANIM SICAKLIĞI	-	°C	-260/+260
ERGİME SICAKLIĞI	ISO 3146	°C	325-330
KIRILGANLIK SICAKLIĞI	-	°C	-200
ÇEKME DİRENCİ	ASTM D- 1708	kg/cm ²	250-300
KOPMADA UZAMA	ASTM D- 1708	%	250-300
DARBE DAYANIMI	ASTM D- 256	cm.kg/cm	15,5
SHORE D SERT	ASTM D- 2240	-	53-57
YÜKTE DEFORMASYON 230°C, 1gün, 140kg/cm ²	ASTM D- 621	%	9,5-11
DİELEKTRİK DİRENCİ	ASTM D- 149	KV/mm	50-80
ISIL İLETKENLİĞİ	ASTM C- 177	Kcal/cm.°C.saat	0,035
ISIL GENLEŞMESİ	ASTM E 831	10-5/°C	12-14
TUTUŞMA SICAKLIĞI	ASTM D- 1929	°C	530

Teflonun aşınmaya ve yük altında deformasyona karşı direkçi büyük oranda artırmak, termal genişleme katsayısını düşürmek termal ve elektriksel gibi özellikler kazandırmak amacıyla, cam elyaf, karbon, grafik, bronz, molibden disülfür gibi çeşitli dolgu maddeleri, ihtiyaca göre çeşitli oranlarda eklenerek Teflon alaşımları da yapılmaktadır [71,72,73,74].

Teflon bir termoplastiktir. Ancak diğer termoplastikler gibi erimez, 327° C de bir geçiş bölgesine sahiptir. Bu sıcaklıkta hemen hemen şeffaf bir pelte haline gelir. Vizkositesi çok yüksek olan pelte, parçanın şeklini ve direncini korur, akmaz. Bu nedenle Teflon parçalar diğer plastikler için, uygulanan yöntemlerden farklı, özel imalat prosesleri gereklidir. Kullanılacak hammadde ve imalat yöntemi parça boyutlarına, kullanım şartlarına ve imalat miktarına göre saptanır [71,72,73,74].

III.1.4.2. Delrin (POM) Malzemenin Özellikleri

POM, formaldehit polimerizasyonu ile elde edilen bir plastiktir. İçindeki oksijen ve metilen gruplarının sahip olduğu yüksek orandaki kristalize yapı ona herhangi bir takviye yapı - malzeme ilave edilmeden bile yüksek oranda sertlik ve sağlamlık sağlar. Alkalilere ve sıcak suya dayanıklıdır. Yaygın olarak kullanılan organik solventlere, petrol ürünlerine ve mineral yağların çoğuna dayanıklıdır. Üstün dayanıklılık, elastikiyet, sertlik, boyutsal kararlılık özelliklerinden bazılarıdır Ana maddesinin acetal reçinelerin oluşturduğu, dişli çark, yatak, burç, takoz, otomotiv sanayi, tekstil sanayi, elektrik sanayi, ve diğer her türlü makine yedek parça imalatında rahatlıkla kullanılmaya olanak veren, sert bir özel plastik türüdür [71,72,73,74].

Piyasadaki üstün özelliklerinden bazıları:

- Çok yüksek mekanik dayanım,
- Yorulmama,
- Çok yüksek darbe dayanımı,
- Bükülmeme ve ağır yük altında bile deforme olmama,
- Kendinden yağlayıcı olma,
- Ölçü tamlığı,
- Mükemmel elektriksel yalıtım özellikleri,
- Geniş kullanım sıcaklığı,
- Üstün kimyasal dayanım ,
- Metal ve aşıp işleme tezgâhlarında kolay işlene bilme.

Tablo III.2 Delrin (POM) Malzemesinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	BİRİM	TEST METODU		DEĞER
ÖZGÜL AĞIRLIK	g/cm ³	53479	1183	1,41-1,43
SERVİS SICAKLIĞI	0 °C	53461	75	100
ERGİME NOKTASI	0 °C	-	-	165-175
TERMAL UZAMA	1/K*10 ⁵	53752	-	11
ÇEKME DAYANIMI	N/mm ²	53455	527	62-71
ÇEKME UZAMASI	%	53455	527	8-10
KOPMA DAYANIMI	N/mm ⁵	53455	527	70
KOPMA UZAMASI	%	53455	527	20-75
DARBE DAYANIMI	Kj/m ²	53453	179	-
ÇENTİK DARBE DAYANIMI kj/m ²	Kj/m ²	53453	179	8
ELASTİKLİK MODÜLÜ	N/mm ²	53452	178	>2700
SU EMME	%	53495	62	0,5
HACİMSSEL DİRENÇ	Ω x cm	53482	167	>10 ¹⁵
YÜZEYSEL DİRENÇ	Ω	53482	167	>10 ¹³
DİELEKTRİK DAYANIMI	KV/mm	53481	243	>50
AŞINMA (ISLAK KUM TESTİ)	%	58836	-	-
SHORE	Skala D	53505		75
ROCKWELL	Skala	-	2039-2	M78-86
BİLYA ÇENTİĞİ 358/30	N/mm ²	53456	2039-1	140-155

Kimyasal yapısı yüksek kristalli bünyesinden dolayı takviyesiz plastikler içinde en sağlam en rijit olan termoplastiktir. Sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeni ile metaller ile plastik arasında bir yer alır ve birçok alanda metallerin yerine kullanılır.

Solventlere, petrol ürünlerine, yağ ve greslere tam dayanıklıdır. Kuvvetli asit ve bazlara, oksidanlara dayanıklı değildir.

UV ışınlarından etkilendiği için açık havada kullanılmaması tavsiye edilir. Üstün mekanik kıymasal özellikleri universal ve CNC tezgâhlarında kolay işlenebilir olusu ile birleşince birçok uygulama alanı ortaya çıkmıştır.

Çeşitli endüstriyel uygulamalarda dişli, yatak, burç, kam makara tipi parçaların imalinde kullanılır. Birçok uygulamada gerek performans, gerek ekonomik yönden metallerden ve diğer plastiklerden daha kullanışlıdır.

Metallerin kullanıldığı çeşitli alanlarda, giderek artan bir hızla metallerin yerlerini almaktadır.

Üstün özelliklerin yanı sıra ucuz ve kolay montaj metotları ile birleştirilmesi maliyet düşürücü bir faktör olmaktadır.

Mamul miller, yataklar, sonsuz vidalar, dişliler, kovanlar, makaralar, pul ve rondelâlar, burç ve kamlar metalden mamul benzerlerinin yerine makine aksamı olarak başarıyla kullanılmaktadır.

Çok yüksek mekanik dayanıma sahip olması ve rutubet emmemesi durumundan dolayı ölçülerini koruyabilme özelliklerine sahiptir. Bu nedenle tekstil sanayinde çok fazla kullanılmaktadır.

Gıda ve ilaç sanayinde konveyör sistemleri, muhtelif dişli ve makine parçaları değişik kullanım alanlarından sadece birkaçıdır [72,73,74].

III.1.5. Lazer İle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Literatür Yardımıyla Tayini

Lazer ile kesilen parçaların ölçülerin tamlığına aşağıdaki değişkenler en çok tesir etmektedir[76].

- Lazer ışığının polarizasyonu
- Nozulun tasarımı
- Nozul ile iş parçasının arasındaki mesafe
- Merceğin odak uzunluğu
- Kesim geometrisi (düz, dairesel)
- Yardımcı gazı tipi
- Yardımcı gazın basınç
- Lazer modu (TEM_{00} , TEM_{01})
- Lazerin gücün devamlı(CW) veya darbeleri (Pulse) olarak iş parçasını işlemesi
- İlerleme hızı
- Lazerin hareket uzunluğunun değişken olup olmaması

Lazer ile kesme işlemindeki kullanılacak basınç, hız ve güç parametreleri kullanılacak lazer kesme makinesinin özelliklerine ve daha önceki bölümlerde anlatılan birçok faktörlere bağlıdır. Bu nedenle bu şartlar makinelerin güç ve yapısına göre farklılıklar gösterebilir. Özellikle metal dışı malzemelerin kesilmesinde kullanılacak parametrelerin belirlenmesi daha da güçtür. Yapılan literatür çalışmalarından, uzmanlık alanı lazer ile kesme işlemleri olan bazı yabancı akademisyenlerle yapılan yazışmalar ve uygulama alanında makinesi olan ve bu işi yapan kişilerle yapılan görüşmeler neticesinde çalışmada kullanılan delrin ve teflon malzemenin kesilmesinde

kullanılabilecek parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Akademik çalışmalar dikkate alınarak; Lazer gücü kritik hızın belirlenmesi amacıyla 600 – 1200 W, ilerleme hızı 2 – 8 m /min ve gaz basınçları 2,5 – 6,5 bar arasında belirlenmiştir.

Kesme işleminde basınç, hız, güç faktörler ve kesme işlemi neticesinde elde edilen ölçüler cevap olarak kabul edilmiş ve her faktörün üç seviyesi olduğu kabul edilmiştir.

Tablo III.3 L9 (34) Deney Tasarım Tablosu

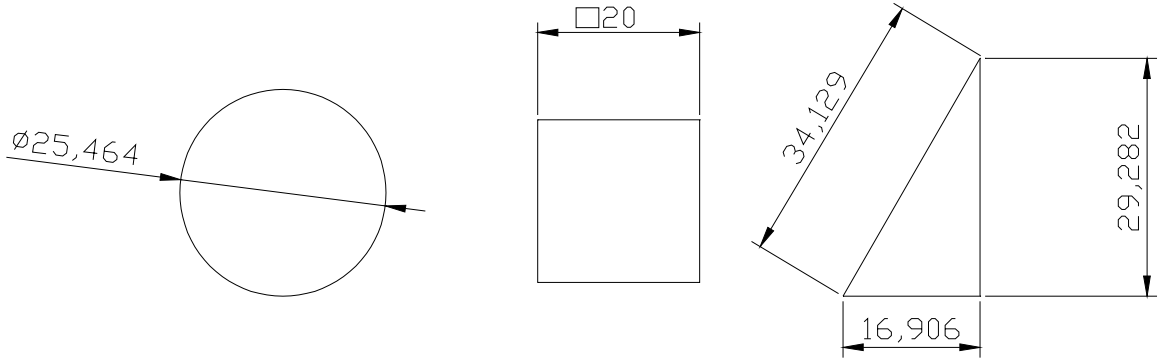
L9 (34) array**

Run	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tablo III.4. Kesme İşleminde Kullanılan Parametreler ve Seviyeleri

Basınç (bar) (C1)	İlerleme (m/min) (C2)	Güç (W) (C3)
2,5	2	600
2,5	5	900
2,5	8	1200
4,5	8	600
4,5	2	900
4,5	5	1200
6,5	5	600
6,5	8	900
6,5	2	1200

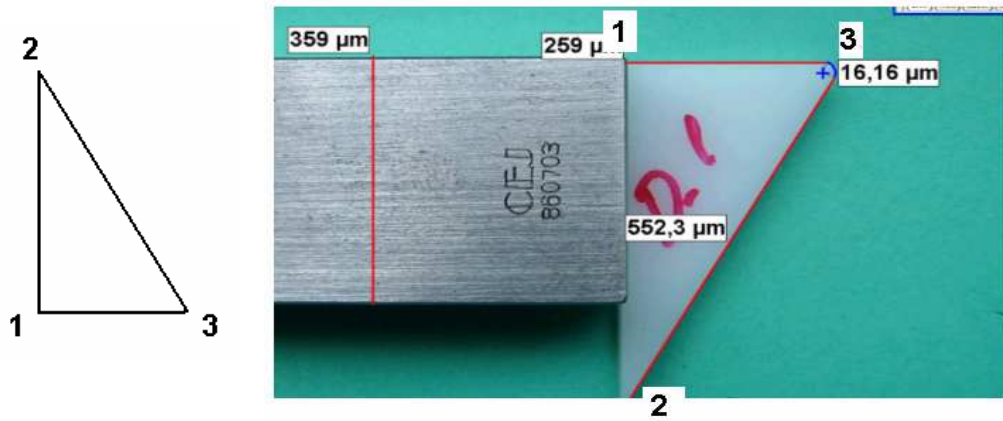
Deneyde 3 mm kalınlıktaki plaka şeklinde teflon ve delrin malzeme kullanılarak çevre uzunlukları eşit olacak şekilde kare, daire ve üçgen geometrilerde kesimler yapılmıştır.



Şekil III.2 Kesilen Geometriler ve Ölçüleri

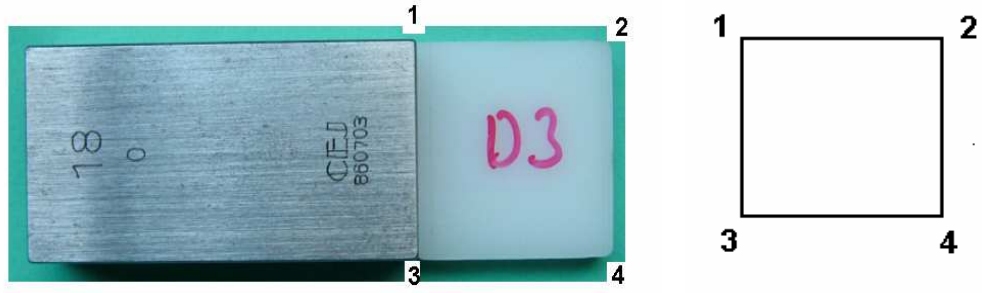
Daire parçaların çap ölçüleri ZEISS Prismo 5 CMM cihazı kullanılarak touch - trigger prob yardımıyla ölçülmüştür.

Üçgen parçaların ölçümlerini Jhonson masterları kenarlara dayatılarak fotoğrafları çekilmiş ve daha sonra ölçümler Clemex adlı metroloji yazılımı ile yapılmıştır. Ölçülerin düzenli olması içinde şekillerin kenarları numaralandırılmıştır.Şekil III.3 ' de gösterilmiştir.



Şekil III.3 Üçgen Şeklindeki Kesimlerin Ölçmelerinde Kullanılan Kenarların Numaralandırılması

Kare parçalarında ölçümlerini Jhonson masterları kenarlara dayatılarak fotoğrafları çekilmiş ve daha sonra ölçümler Clemex adlı metroloji yazılımı ile yapılmıştır. Ölçülerin düzenli olması içinde şekillerin kenarları numaralandırılmıştır. Şekil III.4 ' de gösterilmiştir



Şekil III.4 Kare Şeklindeki Kesimlerin Ölçmelerinde Kullanılan Kenarların Numaralandırılması

BÖLÜM IV

SONUÇLAR VE ANALİZLERİ

IV.1. DAİRE, KARE VE ÜÇGEN

GEOMETRİLERİNDE KESİLEN DELRİN VE

TEFLON MALZEMELERİNİN BOYUT ÖLÇÜLERİ

Kesilen parçaların boyutları, ZEISS Prismo 5 CMM cihazı kullanılarak ölçülmüştür.Tablo IV.1 'de delrin ve teflon parçaların ölçme sonuçları gösterilmektedir.

Tablo IV.1 Ölçme Neticeleri

Delrin-Çap(mm)	Teflon-Çap(mm)	Delrin-Kare(mm)	Teflon-Kare(mm)	Delrin 2-3(mm)	D 1-2 (mm)	De1-3 (mm)	Teflon 2-3 (mm)	T 1—2 (mm)	T 1---3 (mm)
23,96	23,68	17,7391	17,4436	29,6340	26,7440	14,4890	29,9394	26,6922	13,6958
23,94	23,73	17,7735	17,5003	29,8676	26,9144	14,3892	30,0493	26,6240	13,5088
23,79	23,80	17,7381	17,4327	29,9048	26,4051	14,3309	29,8682	26,4892	13,4365
24,02	23,90	17,8656	17,6420	29,6485	27,2085	14,5340	29,8586	26,5925	13,6445
23,93	23,73	17,6262	17,3050	29,4267	26,4851	14,4744	29,6695	26,5069	13,5259
23,83	23,75	17,6875	17,4000	29,3145	26,4707	14,3000	29,7948	26,5482	13,4584
24,00	23,77	17,7677	17,4849	29,5204	27,8816	14,3939	29,6346	26,5706	13,8039
23,93	23,81	17,8700	17,6850	29,2724	26,8024	14,3684	29,5725	26,5005	13,6019
23,81	23,70	17,6181	17,3000	29,1156	26,4080	14,3436	29,5236	26,3241	13,6487

IV.2.BOYUTLAR İÇİN REGRESYON ANALİZİ

Kesme işleminde parametreler birden fazla bağımsız değişken şeklinde olduğundan her bir kesilen parçanın kesme parametrelerine göre boyutlarını hesaplayabilecek denklemlerin elde edilmesi için çok değişkenli regresyon analizi uygulanmıştır. Basınç, ilerleme ve güç birer bağımsız değişken olarak ortaya çıkmaktadır. Çoklu regresyon modelinde bağımsız değişkeni açıklayan birden fazla

bağımlı değişken modelde yer almaktadır. Çoklu regresyon modelleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak çözümlenebilmektedir. Kurulan çoklu regresyon modeli genel olarak aşağıdaki gibi kurulmaktadır.

$$Y = a + b.X_2 + c.X_3 + \dots + z.X_k + e_i \quad 4.1$$

Kurulan çoklu regresyon modeli de basit doğrusal regresyonda olduğu gibi tahmini denklem kurularak hesaplanmaktadır.

\hat{Y} , e_i hata terimi olmadan aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Y = a + b.X_1 + c.X_2 + d.X_3 \quad 4.2$$

$$e_i = Y - \hat{Y} \quad \text{olmaktadır.} \quad 4.3$$

IV.3. KATSAYILARIN ANLAMI VE HESAPLANIŞI

Basit doğrusal regresyon modelinde anlatıldığı gibi çoklu regresyon modelinde de fonksiyonlarda gözlem değerlerinin ortalamalarından farkları alınan değerler kullanılacaktır.

$$(X_1 - \bar{X}_1) = x_1, \dots, (X_2 - \bar{X}_2) = x_2, \dots, (X_3 - \bar{X}_3) = x_3, \dots, (Y - \bar{Y}) = y, \dots, vs \quad 4.4$$

$$\hat{b} = \frac{(\sum y.x_2)(\sum x_3^2) - (\sum y.x_3)(\sum x_2.x_3)}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2.x_3)^2} \quad 4.5$$

$$\hat{c} = \frac{(\sum y.x_3)(\sum x_2^2) - (\sum y.x_2)(\sum x_2.x_3)}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2.x_3)^2} \quad 4.6$$

$$\hat{a} = \bar{Y} - \hat{b}\bar{X}_2 - \hat{c}\bar{X}_3 \quad 4.7$$

Regresyon modeli kurulup, gerekli işlemler yapıldıktan sonra modelin uygunluğuna, katsayıların anlamına bakmak gerekmektedir.

Modelin uygunluğu, belirlilik katsayısı olarak isimlendirilen ve çoklu modellerde de R^2 olarak isimlendirilen istatistik terimi ile hesaplanabilir.

IV.4. ÇOKLU REGRESYON MODELİNİN BELİRLİLİK KATSAYISININ HESAPLANMASI

Kurulan çoklu regresyon modelindeki gözlem değerlerinin modele uyumuna ^{4.8} belirlilik katsayısı ile bakılabilir.

$$R^2 = \frac{\hat{b}_1 \cdot \sum y \cdot x_1 + \hat{b}_2 \cdot \sum y \cdot x_2 + \dots + \hat{b}_k \cdot \sum y \cdot x_k}{\sum y^2}$$

R^2 kullanımı çoklu modellerde uygun olmamaktadır. Çoklu modellerde, modele yeni bir değişken ilave edildiğinde R^2 değeri her zaman artmaktadır. Payın değeri artarken payda aynı kalmaktadır.

Bu nedenle düzeltilmiş çoklu belirlilik katsayısı \bar{R}^2 kullanılıp, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\bar{R}^2 = 1 - \left(1 - R^2\right) \frac{n-1}{n-k} \quad 4.9$$

\bar{R}^2 = Düzeltilmiş çoklu belirlilik katsayısı

R^2 = Çoklu belirlilik katsayısı

n = Örnek olarak seçilen gözlem sayısını

k = Modeldeki değişken katsayısı

Hesaplanan belirlilik katsayısı, bağımlı değişkendeki değişimlerin ne kadarının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını (%) olarak göstermektedir. $0 < R^2 < 1$ arasında değerler alır. 1'e yakın değerler olması regresyon modelinin uygun olduğunu göstermektedir.

IV.5. ÇOKLU REGRESYON MODELİNİN GÜVEN ARALIĞININ BULUNMASI VE HİPOTEZ TESTİ HESAPLANMASI

En Küçük Kareler Yöntemi ile hesaplanan bağımsız değişkenin katsayılarının güvenilirliğinin test edilmesi basit doğrusal regresyon modelindeki hesaplama yöntemine benzerdir.

Basit doğrusal regresyondaki adımlar çoklu modelde her katsayı için ayrı ayrı yapılmaktadır.

Basit doğrusal regresyonda olduğu gibi çoklu modelde de katsayıların standart hataları güvenilirlikte ve hesaplamalarda kullanılacak olması nedeniyle hesaplanmaktadır.

IV.6. ÇOKLU REGRESYON MODELİNDE STANDART HATALARIN HESAPLANIŞI

Standart hata katsayıların değerlerinden küçük olmalıdır.

$$s(\hat{b}) : \quad Var(\hat{b}) = s^2 \frac{\sum x_3^2}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (x_2 \cdot x_3)^2} \quad s(\hat{b}) = \sqrt{Var(\hat{b})} \quad 4.10$$

$$s(\hat{c}) : \quad Var(\hat{c}) = s^2 \frac{\sum x_2^2}{(\sum x_2^2)(\sum x_3^2) - (\sum x_2 \cdot x_3)^2} \quad s(\hat{c}) = \sqrt{Var(\hat{c})} \quad 4.11$$

$$s(\hat{a}) : \quad Var(\hat{a}) = s^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{\bar{X}_2^2 \cdot \sum x_3^2 + \bar{X}_3^2 \cdot \sum x_2^2 - 2 \cdot \bar{X}_2 \cdot \bar{X}_3 \cdot \sum x_2 \cdot x_3}{\sum x_2^2 \cdot \sum x_3^2 - (\sum x_2 \cdot x_3)^2} \right] \quad 4.12$$

$$s(\hat{a}) = \sqrt{Var(\hat{a})}$$

Bu formülasyonda büyük X' ler, (X_2, X_3) bağımsız değişken gözlem değerleridir. Küçük x' ler, (x_2, x_3) bağımsız değişkenlerin ortalamalarından farklarının alınmış şeklindedir.

$$(X_2 - \bar{X}_2 = x_2, X_3 - \bar{X}_3 = x_3)$$

$$s^2 = \frac{\sum e^2}{n - k} \quad 4.13$$

n: örnek olarak seçilen gözlem sayısı

k: modeldeki değişken sayısı

Güvenirlikden emin olmak için aralık tahmini ve hipotez testleri uygulanmalıdır.

Hesaplamalarda kullandığımız \hat{a} , \hat{b} ve \hat{c} katsayıları anakütlenin a , b ve c katsayılarının birer tahminidir. Kullandığımız \hat{a} , \hat{b} ve \hat{c} katsayılarının ortalama ve

beklenen değerleri a , b ve c katsayılarına eşit olsa da ana kütle parametresine kesin eşitliği söylenemez. Tahmin değerlerinin güvenirliliğine standart hata ve varyansının küçüklüğüne bakarak ana kütleyle yakınlığı görülür.

IV.7. GÜVEN ARALIĞININ VE HİPOTEZ TESTİNİN HESAPLANMASI

Çoklu regresyon modelinde katsayıların güven aralıkları, basit regresyon modelinde olduğu gibi her bir parametre için ayrıca hesaplanmaktadır. Çoklu regresyon modelinde basit regresyonda olduğu gibi katsayıların anlamlılığı herbir katsayı için ayrıca hesaplanmak üzere H_0 hipotezi katsayıları 0'a eşitlenerek örnekleme büyüklüğüne göre ($n < 30$) ® t, $n \geq 30$ ® z testi) ile bakılmaktadır. Çoklu modeldeki katsayıların ayrı olarak test edilmesi modeldeki anlamsız katsayıların tespiti için önemlidir. Yine güven aralığı hesaplaması da her bir katsayı için basit regresyonda olduğu gibi ayrı ayrı olarak hesaplanmaktadır. Çoklu regresyon modelinde en çok kullanılan test parametrelerin birlikte hipotez testi olan F testi'dir.

Kurulan hipotez $H_0 : b = c = \dots z = 0$ karşıt hipotezi $H_1 : b \neq c \neq \dots z \neq 0$ şeklindedir.

Regresyon modelinin anlamlılığı bütünüyle test edilmiş olur.

$$F_{hes} = \frac{\left(\hat{b} \cdot \sum y \cdot x_1 + \hat{c} \cdot \sum y \cdot x_2 \right)}{\frac{\sum e_i^2}{(n - k)}} \quad 4.14$$

F değeri hesaplandıktan sonra tablo değeri ile karşılaştırılmaktadır. F tablo değeri, $\alpha = 0,05$ veya $\alpha = 0,01$ gibi seviyelerde ve $f_1 = k - 1$, $f_2 = n - k$ tablodaki serbestlik derecelerinde F dağılımı tablosundan bulunan değerdir. Sonuç olarak; $F_{hes} > F_{tab}$ ise H_0 hipotezi reddedilir. Katsayılar 0'dan farklı ve anlamlı ve çoklu regresyon modelinin uygun olduğu söylenmektedir.

IV.8. DAİRESEL KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Dairesel kesim işleminde Delrin malzemenin çap değerini daha önceden hesaplayabilmek için yapılan çoklu regresyon analizi ile aşağıdaki denklem elde edilmiştir. Analizlerin tümünde Minitab istatistik yazılımı kullanılmıştır.

$$\text{Delrin Çap} = 24,2 + 0,00417 C1 + 0,00222 C2 - 0,000306 C3$$

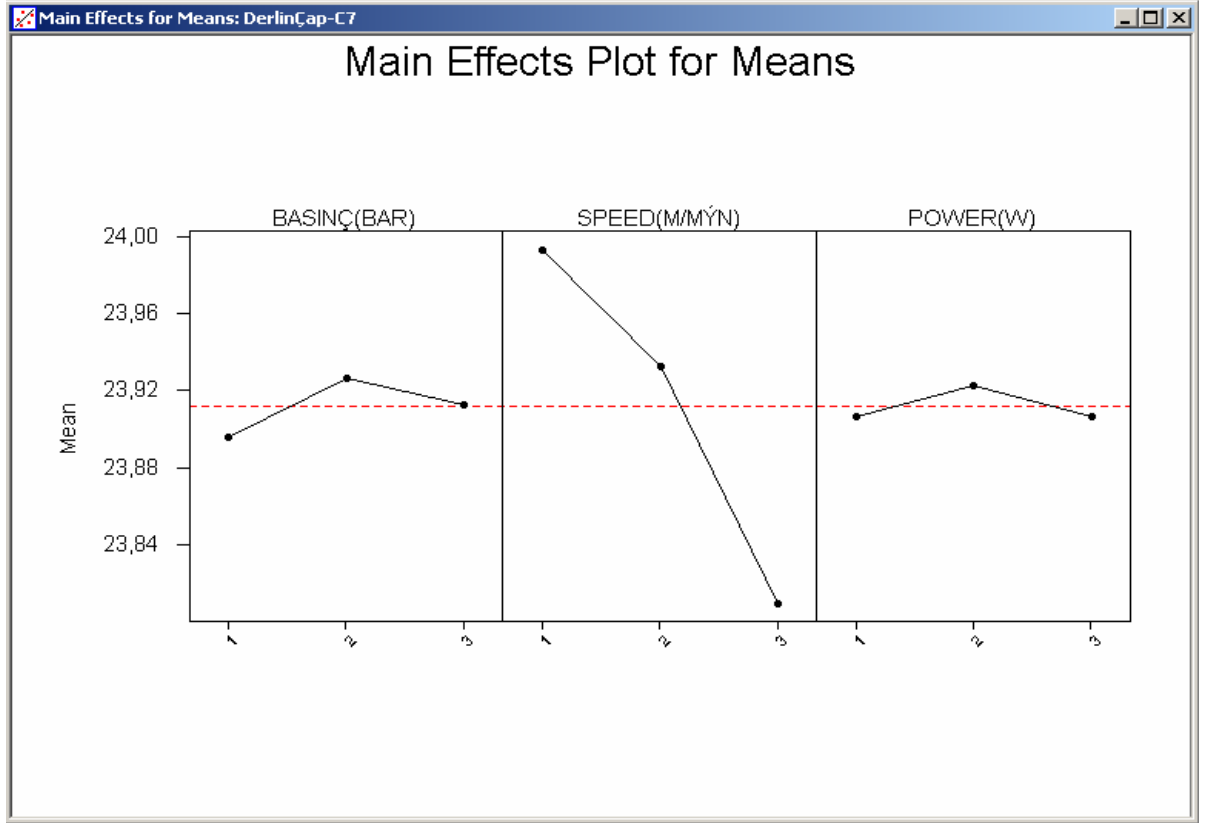
	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	24,1574	0,0486	496,57	0,000		
C1	0,004167	0,005813	0,72	0,506	1,0	
C2	0,002222	0,003876	0,57	0,591	1,0	
C3	-0,00030556	0,00003876	-7,88	0,001	1,0	

$$S = 0,02848 \quad R\text{-Sq} = 92,6\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 88,2\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,051100	0,017033	21,00	0,003
Residual Error	5	0,004056	0,000811		
Total	8	0,055156			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,000417
C2	1	0,000267
C3	1	0,050417



Şekil IV.1 Dairesel Kesim Yapılan Delrin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı

IV.9. DAİRESEL KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Dairesel kesim işleminde Teflon malzemenin çap değerini daha önceden hesaplayabilmek için yapılan regresyon analizi ile aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\text{Teflon-Çap} = 23,7 + 0,00583 C1 + 0,0222 C2 - 0,000056 C3$$

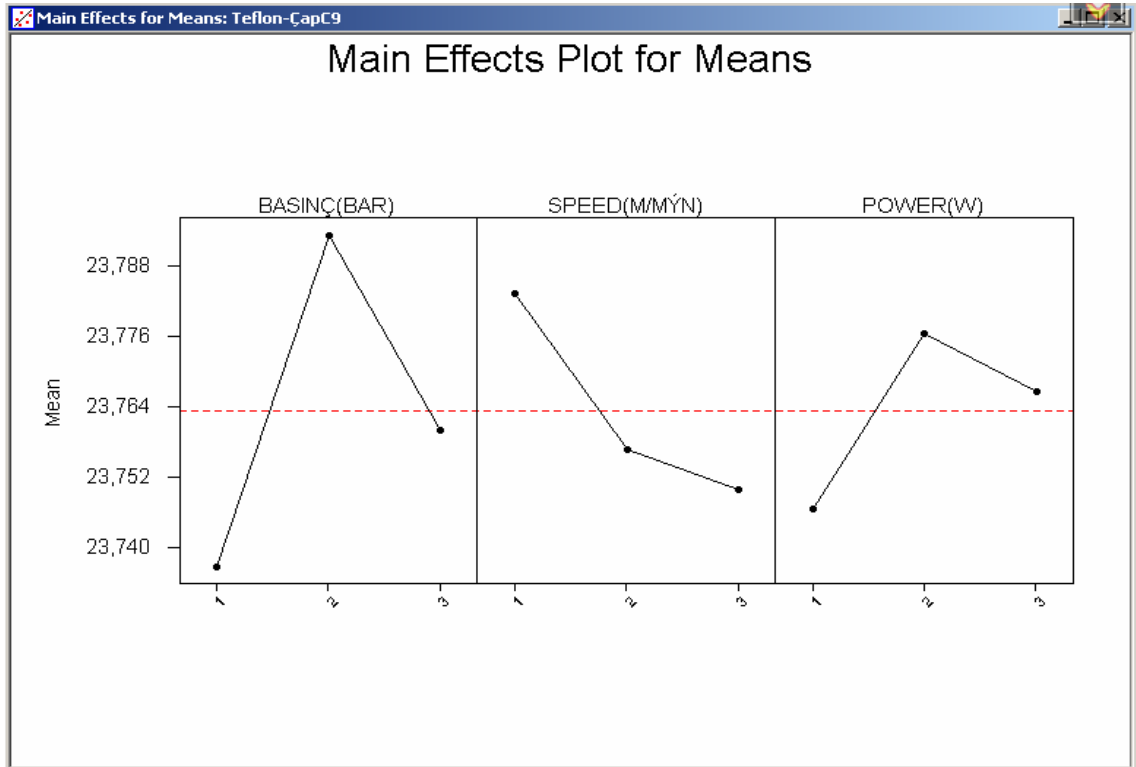
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	23,6760	0,0614	385,91	0,000	
C1	0,005833	0,007331	0,80	0,462	1,0
C2	0,022222	0,004888	4,55	0,006	1,0
C3	-0,00005556	0,00004888	-1,14	0,307	1,0

S = 0,03592 R-Sq = 81,9% R-Sq(adj) = 71,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,029150	0,009717	7,53	0,027
Residual Error	5	0,006450	0,001290		
Total	8	0,035600			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,000817
C2	1	0,026667
C3	1	0,001667



Şekil 4.2 Dairesel Kesim Yapılan Delrin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı

IV.10. KARE KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Kare kesim işleminde kare kenar uzunluğunu kesme şartlarına göre daha önceden hesaplayabilmek için yapılan regresyon analizinde aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\text{Delrin-Kare} = 17,8 + 0,00042 C1 + 0,0272 C2 - 0,000183 C3$$

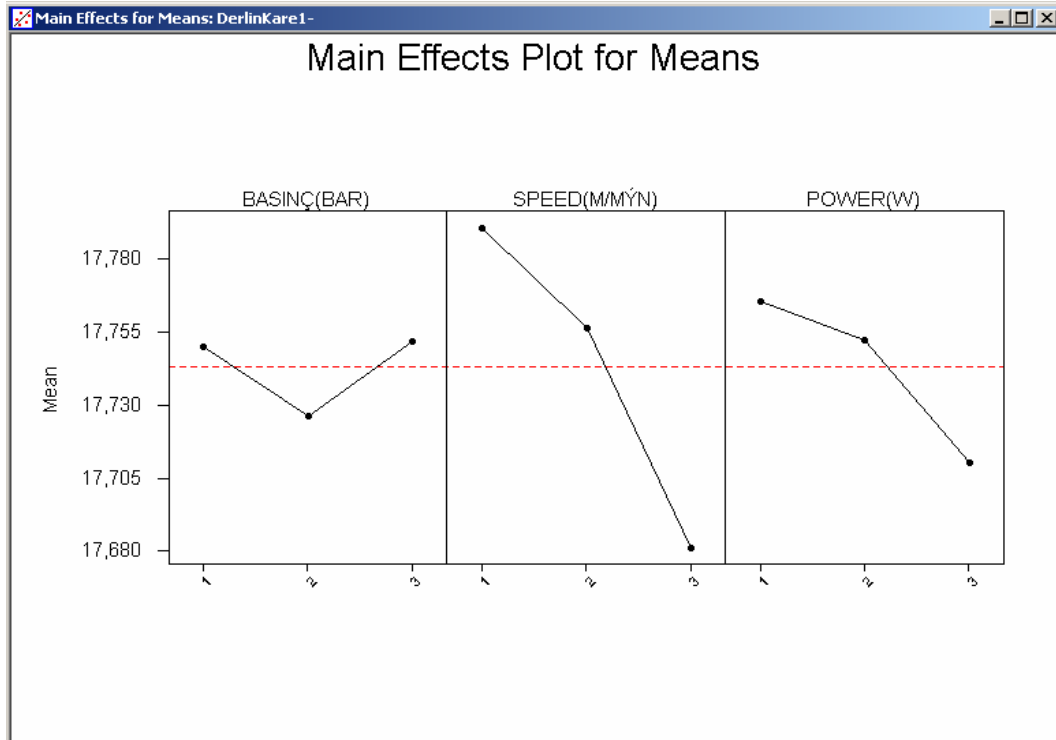
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	17,7691	0,0638	278,33	0,000	
C1	0,000425	0,007629	0,06	0,958	1,0
C2	0,027239	0,005086	5,36	0,003	1,0
C3	-0,00018261	0,00005086	-3,59	0,016	1,0

$$S = 0,03737 \quad R\text{-Sq} = 89,3\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 82,8\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,058077	0,019359	13,86	0,007
Residual Error	5	0,006984	0,001397		
Total	8	0,065062			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,000004
C2	1	0,040066
C3	1	0,018007



Şekil IV.3 Kare Kesim Yapılan Delrin Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı

IV.11. KARE KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Kare kesim işleminde kare kenar uzunluğunu kesme şartlarına göre daha önceden hesaplayabilmek için yapılan regresyon analizinde aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$\text{Teflon-Kare} = 17,5 + 0,0078 C1 + 0,0395 C2 - 0,000243 C3$$

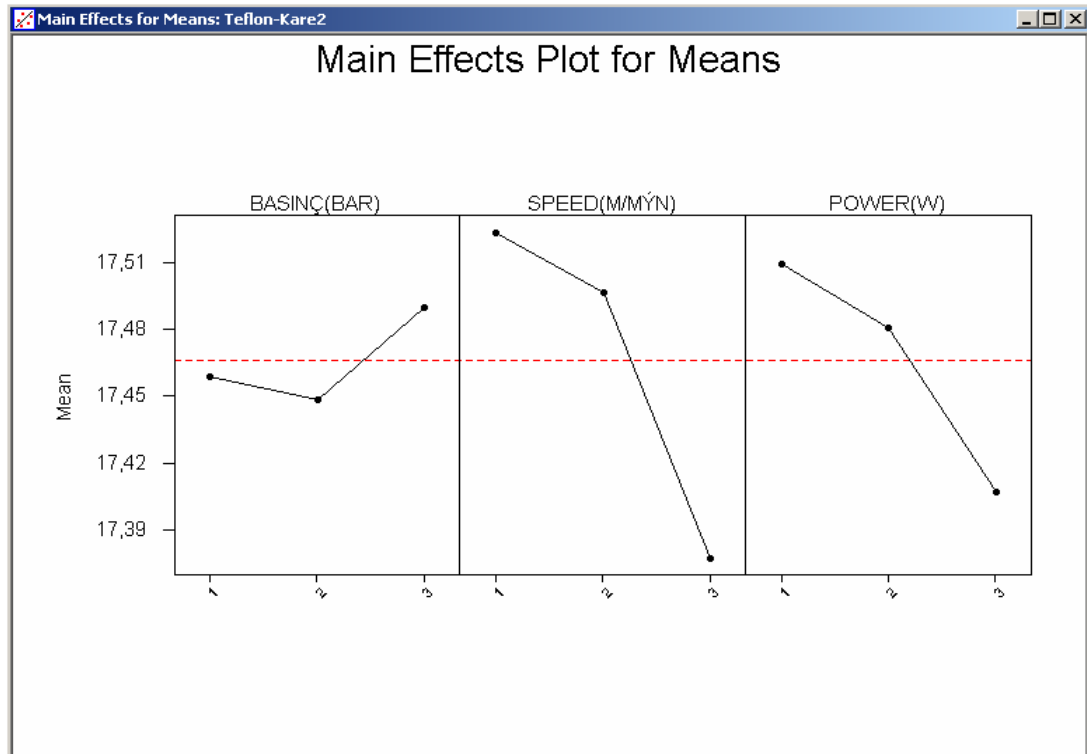
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	17,4523	0,1139	153,19	0,000	
C1	0,00778	0,01361	0,57	0,593	1,0
C2	0,039506	0,009076	4,35	0,007	1,0
C3	-0,00024322	0,00009076	-2,68	0,044	1,0

$$S = 0,06670 \quad R\text{-Sq} = 84,1\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 74,6\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,117673	0,039224	8,82	0,019
Residual Error	5	0,022241	0,004448		
Total	8	0,139914			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,001451
C2	1	0,084277
C3	1	0,031945



Şekil IV.4 Kare Kesim Yapılan Teflon Parça için Değişkenlerin Ortalamaya Göre Dağılımı

IV.12. ÜÇGEN KESİM YAPILAN DELRİN DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Üçgen kesim işleminde üçgen parçanın kenarlarının uzunluklarını kesme şartlarına göre daha önceden hesaplayabilmek için yapılan regresyon analizinde aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

Üçgen parçanın 2-3nolu kenar için,

$$\text{Delrin 2-3} = 30,1 - 0,125 C1 + 0,0361 C2 - 0,000260 C3$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	30,1381	0,2334	129,14	0,000	
C1	-0,12483	0,02789	-4,48	0,007	1,0
C2	0,03608	0,01859	1,94	0,110	1,0
C3	-0,0002600	0,0001859	-1,40	0,221	1,0

$$S = 0,1366 \quad R\text{-Sq} = 83,7\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 74,0\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,48079	0,16026	8,59	0,020
Residual Error	5	0,09333	0,01867		
Total	8	0,57412			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,37400
C2	1	0,07029
C3	1	0,03650

Üçgen parçanın 1-2nolu kenar için ;

$$\text{Delrin 1-2} = 27,5 + 0,0857 C1 + 0,0433 C2 - 0,00142 C3$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	27,4864	0,5440	50,52	0,000	
C1	0,08571	0,06501	1,32	0,245	1,0
C2	0,04327	0,04334	1,00	0,364	1,0
C3	-0,0014168	0,0004334	-3,27	0,022	1,0

$$S = 0,3185 \quad R\text{-Sq} = 72,9\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 56,6\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	1,3614	0,4538	4,47	0,070
Residual Error	5	0,5072	0,1014		
Total	8	1,8686			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,1763
C2	1	0,1011
C3	1	1,0840

Üçgen parçanın 1-3nolu kenar için;

Delrin 1-3 = 14,7 - 0,0086 C1 - 0,00409 C2 -0,000246 C3

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	14,6830	0,0941	156,11	0,000	
C1	-0,00860	0,01124	-0,77	0,479	1,0
C2	-0,004094	0,007493	-0,55	0,608	1,0
C3	-0,00024578	0,00007493	-3,28	0,022	1,0

S = 0,05506 R-Sq = 70,0% R-Sq(adj) = 51,9%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,035300	0,011767	3,88	0,089
Residual Error	5	0,015160	0,003032		
Total	8	0,050460			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,001775
C2	1	0,000905
C3	1	0,032620

IV.13. ÜÇGEN KESİM YAPILAN TEFLON DENEY NETİCELERİNE GÖRE REGRESYON VE VARYANS ANALİZİ

Üçgen parçanın 2-3nolu kenar için,

Teflon 2-3 = 30,3 - 0,0939 C1 + 0,00927 C2 -0,000137 C3

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	30,2668	0,1251	241,96	0,000	
C1	-0,09385	0,01495	-6,28	0,002	1,0
C2	0,009267	0,009965	0,93	0,395	1,0
C3	-0,00013667	0,00009965	-1,37	0,229	1,0

S = 0,07323 R-Sq = 89,4% R-Sq(adj) = 83,0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,226111	0,075370	14,05	0,007
Residual Error	5	0,026813	0,005363		
Total	8	0,252923			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,211388
C2	1	0,004637
C3	1	0,010086

Üçgen parçanın 1-2nolu kenar için ;

$$\text{Teflon 1-2} = 26,9 - 0,0342 C1 + 0,00328 C2 - 0,000274 C3$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	26,9230	0,0983	273,95	0,000	
C1	-0,03418	0,01174	-2,91	0,033	1,0
C2	0,003278	0,007829	0,42	0,693	1,0
C3	-0,00027433	0,00007829	-3,50	0,017	1,0

$$S = 0,05753 \quad R\text{-Sq} = 80,7\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 69,1\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,069264	0,023088	6,97	0,031
Residual Error	5	0,016551	0,003310		
Total	8	0,085815			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,028044
C2	1	0,000580
C3	1	0,040640

Üçgen parçanın 1-3 nolu kenar için ;

$$\text{Teflon 1-3} = 13,8 + 0,0344 C1 - 0,0104 C2 - 0,000334 C3$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	13,7890	0,1096	125,76	0,000	
C1	0,03445	0,01310	2,63	0,047	1,0
C2	-0,010417	0,008735	-1,19	0,287	1,0
C3	-0,00033367	0,00008735	-3,82	0,012	1,0

$$S = 0,06419 \quad R\text{-Sq} = 82,1\% \quad R\text{-Sq(adj)} = 71,4\%$$

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,094463	0,031488	7,64	0,026
Residual Error	5	0,020602	0,004120		
Total	8	0,115064			

Source	DF	Seq SS
C1	1	0,028483
C2	1	0,005859
C3	1	0,060120

BÖLÜM V

TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRME

Delrin ve teflon malzemelerden kesilmiş parçaların boyutsal doğruluğu üzerine basınç ve güç parametrelerinin ilerleme parametresine göre daha etkin olduğu belirlenmiştir.

(Şekil IV.1, IV.2, IV.3,IV.4)

Delrin malzemesinin Teflon'a göre aynı kesme şartları altında daha iyi bir boyutsal doğruluk verdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebi de malzeme özellikleridir.

Elde edilen sonuçlara ait model Regresyon denklemleri yazılmış ve sonuç olarak; denklemlerin çoğunda $R^2 > 0.8$ kriteri sağlanmış olduğu için denklemler deney parametreleri arasındaki ilişkiyi kabul edilebilir şekilde sağlamaktadır.

Deney verilerine göre Delrin malzemenin lazer ile dairesel kesilmesinde en uygun kesme parametrelerinin basınç 6,5 bar, İlerleme hızı 5 m/min ve güç 600 W olduğu belirlenmiştir. Delrin malzemenin lazer ile kare kesilmesinde en uygun kesme parametrelerinin basınç 6,5 bar, İlerleme hızı 8 m/min ve güç 600 W olduğu belirlenmiştir. Görüldüğü Delrin malzemenin kesilme geometrisinin kesme parametreleri üzerine etki yoktur. Bu parametrelerle tekrar yapılan kesimde regresyon analizi ile elde edilen denklemdeki daire boyutlarına %8'lik hata ve kare kesimlerde %14' lük hatalarla ile yaklaşmıştır.

Deney verilerine göre Teflon malzemenin lazer ile dairesel kesilmesinde en uygun kesme parametrelerinin basınç 2,5 bar, İlerleme hızı 8 m/min ve güç 900 W olduğu belirlenmiştir. Teflon malzemenin lazer ile kare kesilmesinde en uygun kesme parametrelerinin basınç 6,5 bar, İlerleme hızı 8 m/min ve güç 1200 W olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerle tekrar yapılan kesimde regresyon analizi ile elde edilen denklemdeki daire boyutlarına %12'lik hata ve kare kesimlerde %22' lik hatalarla ile yaklaşmıştır.

Üçgen kesimler neticesinde elde edilen parçaların boyutlarını ölçmek çok zor olduğu için ayrıca bir kesim yapılmamış sadece parametreler arasındaki ilişkiler gözlenmiştir.

Geometriler açısından bakıldığında dairesel kesilme neticesinde elde edilen boyutların istenen boyuta daha yakın olduğu gözlenmektedir. Bunun sebebi lazerle kesme işleminden sonra kesilen kenar tam dik olmadığından alınan ölçülerde farklılıklar olabileceğinden en kötü durumu görebilmek amacıyla kare kesim ve üçgen kesimlerde boyutları ölçmek oldukça zor olmuş ve gerçek boyuttan en uzakta olan ölçü değerleri alınarak analiz yapılmasıdır. Daha iyi bir analiz için parçaların şekil ve konum toleransları incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Einstein A.: “Phys. Z”, *18,121*” (1917).
- [2] www.bell-labs.com/history/laser/laser_def.html (10/10/2006).
- [3] Steen, W. M.: “Laser Materials Processing”.*2nd Ed, 5-10. (1998).*
- [4] Charles L. C.: “Laser Cutting Guide for Manufacturing” *SME, 3-7 (2004).*
- [5] Jeff H.: “Understanding Lasers:an entry-level guide ”, 2nd Ed. New York, *IEEE Press Understanding Science, (1993).*
- [6] <http://www.lvdgroup.com/> (12/10/2006).
- [7] Addison, L.C.: “Berry and John’s Operating Room Tecnique,” 8.Education, (1996).
- [8] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/emspectrum.html (9/10/2006).
- [9] Yörükoğulları, E.: “Elektrik ve Magnetizma” *Anadolu Üniversitesi Açıköğretim Fakültesi, Fizik Lisans Tamamlama Programı, Eskişehir, (1991).*
- [10] Serway, R.A.: “Fen ve Mühendislik için Fizik,” (Çev: Çolakoğlu, Kemal v.d.), *Palme Yayıncılık, Ankara, (1996).*
- [11] Keller, F.J.; Gettys, W.E.; Skove, M.J.; “Fizik” (Çev: Akyüz, Ömür v.d.) *Literatür Yayıncılık, İstanbul, (1996).*
- [12] Hayt, H.: “Engineering Electromagnetics” , *Mc-Graw Hill, Newyork, (1981).*
- [13] Emmelmann, C.: “Introduction to Industrial Laser Materials Processing Laser GmbH”, Hamburg (1998).
- [14] Herziger and Loosen. : “Werstoffbearbeitung mit Laserstrahlung Grundlagen Systeme Verfahren” , *Carl Hanser Verlag München , Wien (1993).*
- [15] Hirschmann, K.: “Sensorik Schneiden & Schweissen Precitec GmbH Prodcuktatalog”. (1996).
- [16] Meyer, K.: “ Technical Information Laser Application”, *Laser Cuttiing Edition, Trumpf GmbH. (1994).*

- [17] Wilson J.; Hawkes J.F.B. : “ Lasers, principles and applications “, *Prentice Hall*, New York , USA (1987).
- [18] <http://members.misty.com/don/laserco2.htm> (26/10/06).
- [19] El-Kurdi, Z. : “Monitoring and control of the CO2 laser cutting process” , *University of New South Wales*, (2005).
- [20] www.rofin.com/index-e.htm (27/10/06).
- [21] www.nacuttingsystems.com/rofin-sinar.htm (27/10/06).
- [22] www.nuvonyx.com/applications/ (29/10/06).
- [23] www.electro-optics.org/files/laser20workshop/schriempf.pdf (30/10/06).
- [24] Haag, M.; Rudlaff, T .: “Assessment of different high power diode lasers for materials processing “, *Proceedings of the SPIE*, Vol. 3097, pp. 583-591, (1997).
- [25] Ehlers, B.; Herfurth, H.J.; Heinemann, S.; “Hardening and Welding with High Power Diode Lasers ”, *Proceedings of SPIE* Vol. 3945, pp. 63-70, (2000).
- [26] <http://www.electro-optics.org/files/laser20workshop/schriempf.pdf> (31/10/06).
- [27] www.aselsan.com.tr/DERGI/mart98/laser.htm (05/08/05).
- [28] Karaören K.: “ Lazer ile kesim parametrelerinin tespiti ”, Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1999).
- [29] Salehi S. D.: “Sensing and Control of Nd:YAG Laser Cladding Process” , Ph. Thesis, *IRIS* , Melbourne, Avustralia, (2005).
- [30] Kulina, P.; and Richter, K.: “ Materialbearbeitung durch Laserstrahl ”, Berlin, (1993).
- [31] www.formcnc.com.tr/lazer_bilgi.htm (31/10/06).
- [32] www.lazerKaynak.com/bilgi.html (31/10/06).
- [33] www.ccl.fraunhofer.org/download/ (31/10/06).
- [34] www.lcc.fi/english/lataa.htm (31/10/06).
- [35] www.rofin.com/english/products/markings-laser/index.php (31/10/06).
- [36] www.SintecOptronics.com (01/11/2006).
- [37] www.lbbz.de/ (01/11/2006).
- [38] www.obitet.gazi.edu.tr/MEGEP_files/TEMEL20MEKANIK201.pdf (01/11/2006).
- [39] www.rp-photonics.com/laser_marking.html (01/11/2006).

- [40] Dumitrescu P.; Koshy P .; Stenekes J.; Elbestawi M.A.: “High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel ”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006).
- [41] www.le-photonag.com/content/en/serv_and_prod/laserhaerten.php (01/11/06).
- [42] <http://tools.ecn.purdue.edu/~clm/> (02/11/06).
- [43] www.swin.edu.au/iris/pdf/profiles/KellyArmitage.pdf (02/11/06).
- [44] Dumitrescu P.; Koshy P.; Stenekes J.; Elbestawi M.A.: “ High-power diode laser assisted hard turning of AISI D2 tool steel ”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006)
- [45] <http://www2.imse.ksu.edu/~lei/Lei-research-LAM.html> (02/11/06).
- [46] www.csir.co.za/nlc (02/11/06).
- [47] Ulieru D.; Apostol I.: “ Laser cleaning technology for micro and nano device applications”, *Semiconductor Conference*, Bucharest, Romania, (2004).
- [48] www.pnl.gov/cola05/docs/invited_speakers/5i_kane.pdf (02/11/06).
- [49] Lu Y.F.; Zheng W.Y.; Zhang L.: “ Laser Cleaning of Nanoparticles From Solid Surfaces” , *National University of Singapore*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. (2002).
- [50] Sook Koh Y.: “Laser Cleaning as a Conservation Technique for Corroded Metal Artifacts” , *Doctoral Thesis, Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering*, Luleå, Sweden, (2006).
- [51] www.bias.de/SOT/Publikationen/lasermaterials.pdf (03/11/06).
- [52] www.ne.anl.gov/facilities/lal/Publications/laser20glazing/Laser20glazing_1.pdf (07/11/06).
- [53] www.vtt.fi/ (07/11/06).
- [54] www.ne.anl.gov/facilities/lal/Publications/laser20glazing/Laser20glazing_1.pdf (07/11/06).
- [55] http://www.transportation.anl.gov/research/materials/laser_glazing.html (07/11/06).
- [56] Li, W.; Yao, Y. L.: “Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction ”, *ASME Trans. J. of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123, No. 4, (2001).

- [57] Zhang, J.; Cheng, P.; Zhang, W.; Graham, M.; Jones, J.; Jones, M.; Yao, Y. L.: “Effect of Scanning Schemes on Laser Tube Bending,” *ASME Trans. J. of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, (2006).
- [58] Wegener, K.; Adelhardt M.: “Shipbuilding experiences a revolution ”, *Industrial Laser Solutions, Volume 17*, Number 12, pp.9-12, Pennwell Corporation, Tulsa, December (2002).
- [59] www.lasers.org.uk/paperstore/Forming5.pdf (09/11/06).
- [60] www.lasersys.ru/img/dp01.gif (09/11/06).
- [61] www.chemistrydaily.com/chemistry/Transverse_mode (10/11/06).
- [62] Tschatsch and Charchut.: “ Werkzeugmaschinen Einführung in die Fertigungsmaschinen der spanlosen und spanenden Formgebung ”, Carl Hanser Verlag, München Wien, (1991).
- [63] www.parallax-tech.com/faq.htm (11/11/06).
- [64] www.thorlabs.com (11/11/06).
- [65] <http://web.phys.ksu.edu/vqm/laserweb/> (11/11/06).
- [66] [www.makinamuhendisi.com/idx/8/010/article/Lazer-Kesme Tezgahlar.html](http://www.makinamuhendisi.com/idx/8/010/article/Lazer-Kesme_Tezgahlar.html) (11/11/06).
- [67] Tirumalarao, B.; Nath, K. A.: “Melt flow characteristics in gas- assisted laser cutting”, *Sadhana* Vol., 27, Part 5, pp. 569–575. Printed in India, (2002).
- [68] www.trumpf.com/ (11/11/06).
- [69] <http://epubl.ltu.se/1402-1617/2006/243/LTU-EX-06243-SE.pdf> (12/11/06).
- [70] www.vogel-buchverlag.de/ (12/11/06).
- [71] www.yilmaz-ticaret.com (21/11/06).
- [72] www.polimersan.com (21/11/06).
- [73] www.polikim.com.tr (21/11/06).
- [74] www.dupont.com.tr (21/11/06).
- [75] Caiazzo F.; Curcio F.; Daurelio G.; Minutolo M. C. F.: “Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam ”, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 159, Issue 3, 10 February, (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Mahir KURT

E-mail : mahirkurt@hotmail.com

KİMLİK BİLGİLERİ

Doğum Yeri : Anamur /Mersin

Doğum Tarihi : 1981

Yabancı Dili : İngilizce

Uzmanlık Alanı : Yüksek güçlü lazerler ve uygulamaları

AKADEMİK ÜNVANLARI (Üniversitesi ve Tarihi)

Lisans : Marmara Ü, Teknik Eğitim F, Makine Eğt. Bölümü, Tasarım ve konst. Eğt. Ana Bilim Dalı, 2003

Yüksek Lisans : Marmara Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğt. Programı

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KABUL VE ONAY BELGESİ

TEZ ADI

Mahir KURT'ın "**PLASTİK MALZEMELERİN (PTFE VE POM) LAZER İLE KESİLME ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**" isimli Lisansüstü tez çalışması, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/12/2006 tarih ve 4410 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından Makine Eğitim Anabilim Dalı Makine Eğitimi Programında **YÜKSEK LİSANS** Tezi olarak Kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Mustafa KURT (MÜTEF)
Üye : Prof. Dr. Serdar SALMAN (MÜTEF)
Üye : Yrd. Doç. Dr. Oğuz GİRİT (MÜTEF)

Tezin Savunulduğu Tarih : 17/01/2007

ONAY

M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22.01.2007 tarih ve 2007/02-34 sayılı kararı ile 17.01.2007 tarihinde Mahir KURT'ın Makine Eğitimi Anabilim Dalı Makine Eğitimi Programında Y.Lisans (MSc.) derecesi alması onanmıştır.

Marmara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Sevil ÜNAL

