



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK MALZEMELERİN LAZER İLE KESİLMESİNDE KESME
BÖLGESİNİN YAPI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

109715

MUHAMMED AHMET TANRIVERDİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON BÖLÜMÜ

109715

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BURSA – 2001

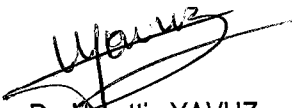
T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK MALZEMELERİN LAZER İLE KESİLMESİNDE KESME
BÖLGESİNİN YAPI VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

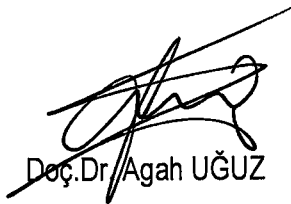
MUHAMMED AHMET TANRIVERDİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

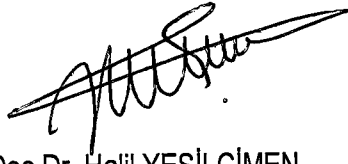
Bu tez 09-11-2001 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile kabul edilmiştir.


Doç.Dr. Nurettin YAVUZ

(Danışman)


Doç.Dr. Agah UĞUZ

(Üye)


Yrd.Doç.Dr. Halil YEŞİLÇİMEN

(Üye)

ÖZET

Günümüzde modern teknolojilerin kullanıldığı endüstride lazer ışını uygulamaları giderek önem kazanmaktadır. Lazerin metal kesmede kullanılması ile daha iyi yüzey kalitesi elde edilmekte ve kütle üretimlerinde ekonomi sağlanmaktadır.

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde de kullanılan DIN EN 10 025 – 94 kalitesinde sac lazer ışını ile kesilmiştir. Kesme kalitesini etkileyen güç seviyesi, kesme gazı ve kesme hızı parametrelerinin etkileri gözlemlenmiştir. 6x50x50 mm ebatların daki numuneler yukarıda ifade edilen parametreler sırasıyla değiştirilerek kesilmiş ve elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Deneylerin sonucunda, parametrelerin değişimi ile lazer kesmede iç yapıda önemli bir değişikliğin olmadığı fakat yüzey kalitesinde büyük miktarlarda farklılıkların olduğu görülmüştür.

Sonuçta kesim değiştirilerek sac malzemede kabul edilebilir kesme kalitesi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Lazer Kesme , Lazer Parametreleri

ABSTRACT**THE RESEARCH OF CUTTING AREA STRUCTURE AND THE PROPERTIES IN CUTTING OF STEEL MATERIAL WITH LASER.**

Recently, in modern equipped industries, laser beam applications have gradually increasing importance. By the use of laser , for steel cutting, a better surface quality can be obtained and cost-effecton is got in mass production.

In this study, sheets of steel, which are used in autmotive industry with a quality degree of DIN EN 140 025-94 has been cutting by laser . While doing this, influence of parameters of power level, cutting speed and cutting gas that effect cutting quality has been observed. Samples with 6 x 50 x 50 mm dimension have been cutting by changing parameters in order and the results are reported. Experimental results show that in the micro structure no difference has occured but surface quality change a lot by changing parameters .

As a result adequate shearing quality and surface roughness can be obtained by changing parameters.

Key words: Laser Cutting , Laser Parameters

İÇİNDEKİLER

Özet	I
Abstract	II
İçindekiler	III
Şekiller dizini	V
Çizelgeler dizini	VII
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Lazerle İşleme	4
2.1.1 Lazer Kesme Metotları	4
2.1.1.1 Lazer Fizyon Kesme	4
2.1.1.2 Lazer Alevli Kesme	5
2.1.1.3 Lazer Süblime Kesme	5
2.2 İşleme Prosesi	6
2.2.1 Malzeme Özellikleri	6
2.2.1.1 Alaşım maddeleri	7
2.2.1.2 Malzemenin mikro yapısı	7
2.2.1.3 Yüzey Kalitesi ve Pürüzlülüğü	7
2.2.1.4 Kaplanmış Yüzeyler	8
2.2.1.5 Işının Yansıması	8
2.2.1.6 Termal İletkenlik	8
2.2.1.7 Isıdan Etkilenen Bölge	9
2.2.2 Farklı Malzemelerin İşlenebilirliği	10
2.2.2.1 Endüstriyel Çelikler	10
2.2.2.2 Paslanmaz Çelik	11
2.2.2.3 Alüminyum	12
2.2.2.4 Titanyum	12
2.2.2.5 Bakır ve Pirinç	13
2.2.2.6 Sentetik Malzemeler	13
2.2.2.7 Organik Malzemeler	13
2.2.3 Lazer Parametreleri	13
2.2.4 Gaz Parametreleri	16

2.3 Malzeme İşleme	16
2.3.1 Lazer Prosesinde Termal Etkenler	17
2.3.1.1 Lazer Isıtma Modeli	17
2.3.1.2 Analitik Davranış	18
2.3.1.2.1 Yarı Sonsuz Gövdelerin Sabit Isı Akışı İle Isıtılması	18
2.3.1.2.2 Sabit Isı Akışı İle Sonlu Kalınlıktaki Tabakanın Isıtılması	21
2.3.2 Lazer Prosesinin Diğer Yönleri	25
2.3.2.1 Mod ve Nokta Büyüklüğü	25
2.3.2.2. Optik Sistem	39
2.3.2.3 Yüzey ve Atmosfer Şartları	31
2.3.4 Lazer İle Delme , İşleme ve Kesme	36
3. MATERYAL VE YÖNTEM	51
3.1 Materyal	51
3.2 Yöntem	52
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	54
4.1 Isıdan Etkilenmiş Kesim Bölgesindeki İç Yapının İncelenmesi	54
4.2 Kesim Bölgesindeki Yüzey Kalitesinin İncelenmesi	63
4.3 Lazer kesme ve preste kalıp ile parça imalatının maliyet itibarı ile incelenmesi	68
4.3.1 Tezgahın çalışma maliyetinin hesaplanması	68
4.3.1.1 Gerekli tanımlar	68
4.3.1.2 Kabuller ve Hesaplamalar	69
4.4 Tartışma	71
KAYNAKLAR	73
TEŞEKKÜR	75
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 CO ₂ lazeri	3
Şekil 2.2 Akış yoğunluğu zaman grafiği	20
Şekil 2.3 Isı akışı gauss dağılımı	21
Şekil 2.4 Kalınlığı 1 olan tabakada sıcaklık değişimi	22
Şekil 2.5 Kalınlığı 1 olan sac metalde gauss dağılımı	23
Şekil 2.6 Kalınlığı 1 olan sac metalde sıcaklık değişimi	24
Şekil 2.7 wo yarıçapının büküm noktasından TEMoo modunun yayılımı	26
Şekil 2.8 Gauss dağılımı ile işlemenin rakamsal olarak gösterimi	28
Şekil 2.9 Holografik lens sistemi için konstrüksiyon geometrisi	31
Şekil 2.10 Birkaç çeşit metalin dalgaboyunun fonksiyonu olarak yansıtıcılığı	32
Şekil 2.11 (a) Döküm molibden üzerinde yakut lazer ile oluşturulan eriyik havuz geometrisine etkisi (Havada eritilmiş)	34
Şekil 2.11 (b) Döküm molibden üzerinde yakut lazer ile oluşturulan eriyik havuz geometrisine etkisi (Argonda eritilmiş)	34
Şekil 2.12 Yakut lazeri ile Nikel ve Alüminyumda üretilen delik derinlikleri	36
Şekil 2.13 Yakut lazeri ile delinmiş alümina seramik	39
Şekil 2.14 Pulsu yakut lazeri ile delinmiş yakut saat parçaları	41
Şekil 2.15 Süperpuls CO ₂ lazeri ile delinmiş alümina seramik	42
Şekil 2.16 Süperpuls CO ₂ lazeri ile delinmiş alümina seramik parçanın elektron mikroskobu ile çekilmiş resmi	44
Şekil 2.17 3300 pps pulsla, CO ₂ lazeri ile delinmiş alümina seramik	45
Şekil 2.18 Q-switched YAG lazeri ile çizilmiş alümina seramik	46
Şekil 2.19 Alümina seramikte YAG lazerinin tekrar oranı ve çizme geçiş sayısının çizik derinliğine etkisi	47
Şekil 2.20 Gaz jeti ile takviye edilmiş 150 W CO ₂ lazeri ile kesmede oksijen debisinin kesme hızına olan etkisi	48
Şekil 3.1 Numune olarak kesilen parça	51
Şekil 4.1 Lazerde kesilmiş parça (1.1 nolu)	54
Şekil 4.2 Lazerde kesilmiş parça (1.2 nolu)	55
Şekil 4.3 Lazerde kesilmiş parça (1.3 nolu)	55
Şekil 4.4 Lazerde kesilmiş parça (1.4 nolu)	56
Şekil 4.5 Lazerde kesilmiş parça (1.5 nolu)	56
Şekil 4.6 Lazerde kesilmiş parça (1.6 nolu)	57

Şekil 4.7 Lazerde kesilmiş parça (1.7 nolu)	57
Şekil 4.8 Lazerde kesilmiş parça (1.8 nolu)	58
Şekil 4.9 Lazerde kesilmiş parça (1.9 nolu)	58
Şekil 4.10 Lazerde kesilmiş parça (1.10 nolu)	59
Şekil 4.11 Lazerde kesilmiş parça (1.11 nolu)	59
Şekil 4.12 Lazerde kesilmiş parça (1.12 nolu)	60
Şekil 4.13 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 nolu parçaların Kesme hızı-ısıdan etkilenen bölge derinliği grafiği	61
Şekil 4.14 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 nolu parçaların Kesme gazı basıncı-ısıdan etkilenen bölge derinliği grafiği	61
Şekil 4.15 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 nolu parçaların Güç-ısıdan etkilenen bölge derinliği grafiği	62
Şekil 4.16 Lazerde kesilmiş parça (1.1 nolu)	63
Şekil 4.17 Lazerde kesilmiş parça (1.2 nolu)	63
Şekil 4.18 Lazerde kesilmiş parça (1.3 nolu)	63
Şekil 4.19 Lazerde kesilmiş parça (1.4 nolu)	64
Şekil 4.20 Lazerde kesilmiş parça (1.5 nolu)	64
Şekil 4.21 Lazerde kesilmiş parça (1.6 nolu)	64
Şekil 4.22 Lazerde kesilmiş parça (1.7 nolu)	64
Şekil 4.23 Lazerde kesilmiş parça (1.8 nolu)	64
Şekil 4.24 Lazerde kesilmiş parça (1.9 nolu)	65
Şekil 4.25 Lazerde kesilmiş parça (1.10 nolu)	65
Şekil 4.26 Lazerde kesilmiş parça (1.11 nolu)	65
Şekil 4.27 Lazerde kesilmiş parça (1.12 nolu)	65
Şekil 4.28 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 nolu parçaların Kesme hızı-yüzey pürüzlülüğü grafiği	66
Şekil 4.29 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 nolu parçaların Kesme gazı basıncı-ısıdan etkilenen bölge derinliği grafiği	67
Şekil 4.30 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 nolu parçaların Güç-ısıdan etkilenen bölge derinliği grafiği	67
Şekil 4.31 Maliyet analizi	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Lazer kesimdeki ısıdan etkilenme derinliği	9
Çizelge 2.2 Lazer modları	14
Çizelge 2.3 Lazerin kullanım alanları	35
Çizelge 2.4 Gaz jeti ilaveli CO2 lazeri ile kesim sonuçları	50
Çizelge 3.1 Kesilen numunelere ait kesme parametreleri	52
Çizelge 4.1 Isıdan etkilenmiş bölge derinliği	60
Çizelge 4.2 Yüzey pürüzlülüğü değeri	66
Çizelge 4.3 Karşılaştırma tablosu	69



1. GİRİŞ

Lazer istenilen etkiyi üretmek için ısı kaynağı olarak kullanılır. Lazer ışınının absorbe edilmesi ile oluşan ısı kaynağının karakteristikleri direk olarak lazer prosesinin karakteristikleri ve avantajlarıdır. Bundan dolayı absorbe eden malzeme ve lazer ışınının her ikisinin özelliklerine bağlıdır.

Lazer prosesi birçok seviyede takip edilir. Lazerin konvansiyonel işlem araçlarının yanında kullanıldığı üretim yerleri ve üretimde kullanmak amacıyla lazer prosesinin geliştirilmesine bağlı olabilecek yeni üretim düşüncelerinin olabirliğinin araştırıldığı laboratuvarları kapsar. Lazer proses uygulamalarının laboratuvarında teknik olarak yapılabildiği halde ekonomik sebepler nedeniyle üretim için uygun olmadığı sıklıkça görülür. Gerçekten de yüksek işletme maliyeti ve proses hızının sınırlı olması nedeniyle laboratuvarlarda uygulanabilirliği kanıtlanan birçok yöntemin üretimde kullanılması gecikmektedir. Değişik endüstrilerde kullanışlı prosesler oluşturmak için mevcut lazer prosesinin karakteristiklerinin bileşimi, üretim aşamalarında gelişme göstermiştir, bununla beraber son yıllarda üretim uygulamaları hızla artmıştır.

Lazerle proses aracı olarak ilgilenme onun bir ısı kaynağı olan karakteristiğinin sonucudur. Bu karakteristiklerin birkaçını listeleyebiliriz.

a) Lazer dalga boyu, genellikle optik enerjinin termal enerjiye dönüştüğü yüzeyin hemen altındaki bölgede optik absorpsiyon derinliği için bulunabilir. Absorpsiyon derinliği metaller için 200 Å olabilir.

b) Lazer ışını küçük bir noktaya yüksek yoğunlukta ($10^6 - 10^{10}$ W/cm²) odaklanmaya izin verir. Bu da malzemeyi çok hassas ölçülerde (1 µm) ısıtmayı ve ısıtılan malzemenin sıcaklığının çok kısa sürede erime, kaynama noktasına gelmesini sağlar. Q switched lazeri ile ısıtılan malzemeler için ısıtma süresi nano saniyelerle ölçülür.

Parça içine olan termal penetrasyon derinliği küçük ve bu özellik küçük optik penetrasyon derinliği ile birleştiğinde lazer ile ısıtmayı öncelikle bir yüzey olayı haline getirir. Malzemenin ana kısmının sıcaklığını arttırmadan malzemeyi lokal olarak ısıtabiliriz. Isıya duyarlı cihazların birleştirme kaynağının başarısı, karta zarar vermeden elektronik

devrelerin işlenmesi, ağaç, plastik ve kağıdın yanmadan kesilmesi lazerle ısıtmanın sonucu olan yüksek ısı akısına bağlıdır. Yüksek ısıtma oranının metalurjik bir avantajı da uçaklarda kullanılan mukavemeti yüksek alaşımlarının kaynatılmasında görülür.

c) Lazer ışını çıkış enerjisi iş parçasına fiziksel temas olmayan, bir işleme aracı olarak kullanılabilir. Bundan dolayı olası bozulmalar minimize edilir. Enerji herhangi bir saydam malzeme içinden de iletilebilir, kapalı ortamda olması gereken yada ulaşılamaz parçaların kaynatılmasında ve işlenmesinde önerilebilir. Bu enerjinin başka avantajları da belirli iş parçalarına uygun kontrollü çalışma atmosferinin oluşturmanın kolay olması, parçayı tutmadan optimum yerleşimin sağlanabilmesidir.

Bu karakteristiklerin etkili olarak kullanılabilme kabiliyeti malzeme işleme için uygun bir çok değişik tipteki lazerin kullanılabilmesi ile değer kazanır. Bu lazerlere bir çok tip uygulama için değişik kombinasyonda çıkış parametreleri sunar. Bu parametrelerin en önemlileri dalga boyu parlaklık güç ve lazer modudur. Lazerin seçimi işlenecek malzemenin tipine uygulamanın özelliğine bağlıdır. Genelde spesifik bir uygulama için seçilen lazer tek değildir. İş yapmak gerekli parametrelerin kombinasyonu birden fazla lazer tipi sunabilir ve kullanılacak lazerin kararında maliyet, kullanılabilir ekipmanlar ve uyuşabilirlik diğer seri üretim etkenleri ile beraber büyük rol oynar.

Birçok lazer tipinden sadece birkaçı malzeme işleme için geliştirilmiştir. En sık rastlanan lazerler pulslu yakut, neodmiyum-doped glass (Nd-glass), pulslu ve sürekli karbondioksit (CO₂), neodmiyum –doped itriyum, alüminyum, garnet (YAG) lazerleridir. Argon ve Helyum-Neon (He-Ne) lazerleri diğerlerine göre daha az kapsamlı olmakla beraber bazı uygulamalarda kullanılır .

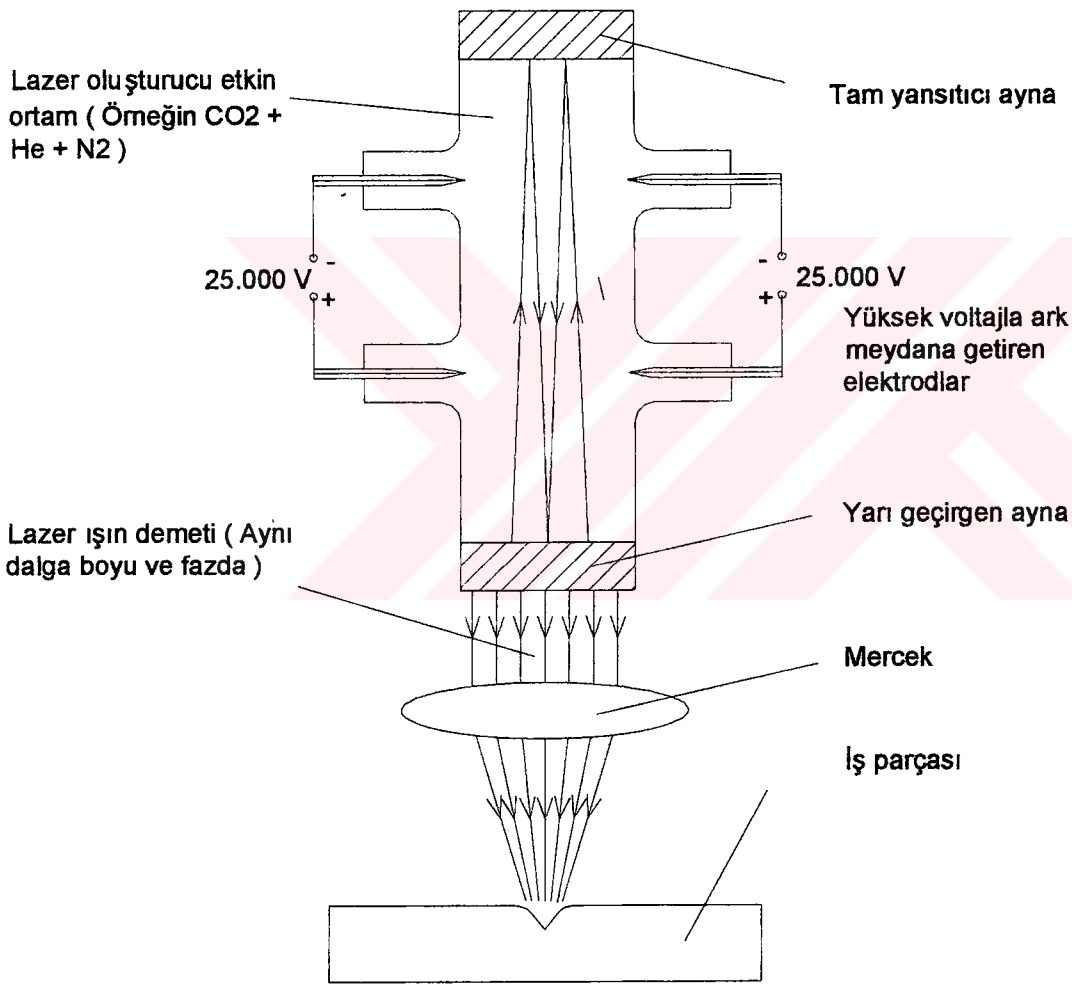
Yakut Nd-Glass lazerleri yüksek enerjili pulslar üretmeye yatkındır. Tek bir pulsla büyük miktarlarda malzeme kaynak ve delme için ısıtılması gerektiğinde bu lazerler kullanılır. Karbondioksit lazerleri kapsamlı olarak eritme, delme metal olmayan malzemelerin kesilmesinde kullanılmıştır. Son zamanlarda delme ve ince metallerin dikiş kaynağında başarılı uygulamalar bulunmuştur. Nd:YAG lazerlerin hassas kaynağı ve delme işlemleri için kullanılmıştır. Fakat daha sık olarak ince metallerle çalışılan mikro elektronik uygulamalarda kullanılır. Argon- ve He-Ne lazerleri ince filmlerin üzerindeki çok küçük noktaların işlenmesi gibi, çok az güç gerektiren yerlerde kullanılır (Cohen 1969).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Lazerle İşleme

İngilizce yazılışı ile LAZER sözcüğü bir akronimdir (Light amplication by stimulated emission of radiation) : Dürtülmüş ışımaya yayımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi (yükseltilmesi, güçlendirilmesi).

Genel esasları Şekil 2.1 'de görülmektedir .



Şekil 2.1 : CO₂ lazeri ; CO₂ atomlarına ait elektronların uyarılması için, yüksek voltaj ile elde edilmiş ark kullanılmıştır . CO₂ lazerlerinde sürekli ışın elde edilir .

Etkin ortamın bazı atomlarına ait elektronlar, verilen enerji sebebiyle üst enerji seviyelerine sıçrarlar (uyarılmış durum). Bu üst düzeye "pompalanmış elektronlar" bir süre sonra aradaki metastabil enerji düzeyinden temel durumlarına, alt enerji düzeyine dönerken

aradaki fark kadar enerji açığa çıkar (ışınım); diğer bir deyişle ışık dalgası (foton) yayımlanır. Yayımlanan ışık dalgası ortamdaki yansıtıcı uçlar arasında gidip gelir. Uyarılmış atomlar diğer komşu atomları uyararak zincirleme reaksiyon oluştururlar. Bu zincir reaksiyonun sürekli tekrarlanmasıyla şiddeti giderek artan dalgalar sonuçta tam yansıtıcı olmayan aynadan dışarı çıkarak lazer adı verilen söz konusu ışın demetini oluştururlar . Bu ışın demetinin en önemli özelliği; bütün ışınların aynı dalga boyuna sahip olmaları ve aynı fazda yayılmalarıdır .Bu nedenle hemen hiç yayılma göstermeyen ışınlar bir mercek yardımı ile odaklanabilir . Öyle ki 0.05 mm çaplı bu noktada enerji yoğunluğu $10^4 - 10^{10}$ W/cm² değerlerine ulaşır . bu da bilinen herhangi bir malzemeyi buharlaştırmaya yeterlidir (Güleç ve Çapa 1995).

2.1.1 Lazer Kesme Metotları

Aşağıda Lazer ile malzeme kesmede kullanılan 3 temel kesme yöntemi tarif edilmiştir .

2.1.1.1 Lazer Fizyon Kesme

Lazer fizyon kesmede iş parçası lokal olarak eritilir. Ergimiş malzeme gaz akımı yoluyla dışarı atılır. Malzemenin taşınımı sıvı fazda olduğundan, bu işlem lazer fizyon kesme olarak adlandırılır.

Lazer ışını ergimiş malzemeyi kesme aralığından çıkmaya zorlayan fakat kesme işlemi ile ilgisi olmayan yüksek saflıkta inert kesme gazları ile desteklenir.

Bir malzemeyi buharlaştırmak için gerekli enerji daima malzemeyi eritmek için harcanacak enerjiden daha yüksektir. Bu yüzden Lazer fizyon kesme, lazer süblime kesmeden daha yüksek kesme hızı sağlar. Lazer fizyon kesmede, lazer ışını sadece malzeme tarafından absorbe edilir. Bu nedenlerden dolayı kesme işlemi süblime kesmeye göre daha ekonomik olmaktadır.

Maksimum kesme hızı lazer gücü ile artar ve sac kalınlığına, malzeme fizyon sıcaklığına ters orantılı olarak düşer . Kesme hızı için limit faktörler, önce lazer gücü, kesme aralığındaki gaz basıncı ve ısı iletimidir.

Lazer fizyon kesme demir esaslı ve titanyum alaşımlı malzemelerde oksitsiz kesme sağlar.

Fizyonu oluşturan güç akışının yoğunluk alanı (Buharlaşma olmadan) çelik malzeme için 10^4 W/cm² ile 10^5 W/cm² arasındadır (Bystronic 1996).

2.1.1.2 Lazer Alevli Kesme

Lazer alevli kesim fizyon kesimden farklı olarak kesme gazı olarak Oksijen kullanır. Oksijen ile kesme, tavllanmış metalin üzerine oksijen gönderilerek malzeme ile oksijen arasında ekzotermik bir reaksiyon boşaltılarak gerçekleştirilir. Bu etkiden dolayı, DKP sacda bu metot ile sağlanabilen kesme hızı fizyon kesmeye göre daha yüksektir.

Diğer taraftan bu işlem fizyon kesme ile kıyaslandığında daha düşük kaliteli kesme üretilir. Daha geniş kesme aralığı, fark edilebilir derecede yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölgenin büyümesi ve kenarlarda kesim kalitesinin azalması gibi olumsuz sonuçlar doğurur.

Alevli kesme hassas parçalar ve dar geometrili köşelerde kritik (Köşeyi yakarak yok etme tehlikesi) olabilir.

Kullanılan lazer gücü kesme hızını belirler. Kesme hızı için limit faktörler, lazer gücü ayarlandığında, oksijen ve ısı iletimidir (Bystronic 1996) .

2.1.1.3 Lazer Süblime Kesme

Lazer süblime kesim işleminde, kesme aralığındaki malzeme çok yoğun lazer ile buharlaştırılır. Malzeme buharının kesme aralığında yoğunlaşmaması için malzemenin kalınlığının lazer ışını çapını çok fazla aşmaması gerekir. Bu işlem yalnızca ergimiş malzemenin atılmasından kaçınılması gereken uygulamalar için uygundur. Tahta veya seramikten yapılmış malzemelerde kalınlık ışın çapından büyük olsa bile bu malzemeler bu yöntem ile kesilebilir. Çünkü bu malzemelerde yoğunlaşma olayı görülmez .

Lazer süblime kesimde, optimum ışın odaklaması, malzeme kalınlığına ve ışın kalitesine bağlıdır. Lazer gücü ve buharlaşma ısısının optimum odak mesafesine etkisi azdır. Maksimum kesme hızı belirli bir malzeme kalınlığı için malzemenin buharlaşma ısısı ile ters orantılıdır. Gerekli güç yoğunluğu 10^8 W/cm² den büyük olmalıdır. Bu yoğunluk malzemeye, kesme derinliğine ve odak noktasına bağlıdır. Kesme hızı için limit faktör, kesilecek malzeme kalınlığı için yeterli lazer gücü ayarlandığında gaz jeti hızıdır (Bystronic 1996).

2.2. İşleme Prosesi

İşleme prosesi terimi lazer ışını, kesme gazı ve iş parçası arasındaki etkileşime karşılık gelir. Bu işlemin olduğu bölgeye kesme bölgesi denir. Bu bölgede bulunan lazer gücü, parçayı eritmek yada buharlaştırmak için yeterli olmalıdır. Absorbe edilen lazer tarafından ısıtılan ve eritilen kesme bölgesine dik yüzey oluşur.

Lazer alevli kesmede, ergime bölgesi oksijen akışı ile ileri derecede ısıtılır ve kaynama noktasına yakın sıcaklığa gelinir. Yüksek buharlaşmanın sonucu olarak malzeme kaldırılır. Aynı zamanda kesme gazı ile sıvı malzeme iş parçasının altından atılır.

Lazer fizyon kesmede, sıvı malzeme kesme aralığını oksitten koruyan gaz yardımı ile atılır. Sürekli ergime bölgesi kesme yönünü takip ederek kayar. Bundan dolayı sürekli kesme aralığı yaratılmış olur. Birçok önemli lazer kesme uygulaması bu bölgede oluşur. Bu uygulamaların analizi lazer kesme işlemi açısından önemli bilgiler içerir. Bu yolla kesme hızını hesaplamak ve kesim çizgilerinin oluşum karakteristiğini açıklamak mümkündür (Bystronic 1996).

2.2.1. Malzeme Özellikleri

İş parçası üzerindeki kesme işlemi sonucu temiz ya da tam tersine pürüzlü ve yanmış olabilir (Bystronic 1996).

Kesme kalitesine etkileyen en önemli faktörler şunlardır .

- Alaşım maddeleri
- Malzemenin mikro yapısı
- Yüzey kalitesi
- Yüzeyin pürüzlülüğü
- Yüzeyin kaplanmış olması
- Işının yansımaları
- Isı iletimi
- Ergime noktası
- Ergime ısısı
- Buharlaşma sıcaklığı

2.2.1.1. Alaşım maddeleri

Alaşım maddeleri malzemenin mukavemetini, özgül ağırlını, kaynak kabiliyetini, oksitlenme ve asitlere olan direncini belirler. Demir esaslı alaşımları oluşturan en önemli maddeler; karbon, krom, nikel, magnezyum ve çinkodur (Bystronic 1996) .

Yüksek karbon (>%0.8 C) içeren malzemeyi kesmek daha zordur. Aşağıdaki karbon çelikleri lazerle çok iyi kesilebilir. (St 37-2 , StW 22 , DIN 1.203)

2.2.1.2. Malzemenin Mikro Yapısı

Kesilecek malzemenin mikro yapısını oluşturan tanecikler ince ise kenarlarda daha iyi kesme yüzey kalitesi görülür (Bystronic 1996) .

2.2.1.3. Yüzey Kalitesi Ve Pürüzlülüğü

Eğer kirli veya oksit tabakası ile kaplı ise malzemeyi kesme zorlaşır. Malzeme kesilmeden önce kumlama işlemine tabi tutulursa daha iyi bir kesme kalitesi elde edilir (Bystronic 1996).

2.2.1.4. Kaplanmış Yüzeyler

En sık karşılaşılan yüzey uygulamaları; galvanizleme, boya, lamine plastik film ile kaplamadır.

Çinko kaplanmış parçalar, kaplamanın kalınlığına bağlı olarak kenarlarda düşük kesme kalitesi oluşturur.

Boyalı ürünlerdeki kesme kalitesi boyalı ürünlerdeki malzemelerin bileşimine bağlıdır. Boyalı panelleri işlemek için önce düşük güç parametreleri seçilerek yüzey üzerindeki boya yakılır. Daha sonra işlenecek malzemeye uygun parametreler seçilerek önceden yakılmış yerler kesilir.

Lamine kaplı plakalar lazer kesimi için çok uygun malzemelerdir. Kapasitif sensörle (Kesici nozulun sacdan olan mesafesini kapasitif olarak belirleyerek odak mesafesinin korunmasını sağlayan elektriksel sistem) problemsiz çalışmak ve lamine kaplama için optimum yapışma sağlamak (Kabarık oluşmasını engellemek) amacıyla lamineli yüzey üste gelecek biçimde kesme yapılır (Bystronic 1996).

2.2.1.5. Işının Yansımaları

Her malzeme yüzeyi, yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak farklı ışın yansıtma özelliklerine sahiptir. Birçok alüminyum alaşımı, bakır, pirinç ve paslanmaz çelik yoğun olarak ışın yansıtırlar.

Böyle malzemeleri kesmek için, çok hassas ayarlanmış odak pozisyonuna gereksinim duyulur. Zımpara kağıdı ile yada kumlama ile yüzeyde ön bir işlem yapılarak malzemenin kesme kalitesi artırılır (Bystronic 1996).

2.2.1.6. Termal İletkenlik

Düşük termal iletkenliğe sahip malzeme, yüksek termal iletkenliğe sahip malzeme ile kıyaslandığında ergime için daha düşük güce ihtiyaç gösterir.

Örneğin çelikte ve krom-nikelde gerekli olan güç, bu işlemde daha az ısı absorpsiyonu olması nedeniyle imalat çeliklerine gerekli güçten daha azdır.

Diğer taraftan bakır, alüminyum ve pirinç gibi malzemeler lazer ışını absorpsiyonu ile yaratılan büyük bir ısı miktarını dağıtırlar. Isı, ışın hedef noktasından uzaklara iletiildiği için, ısıdan etkilenen bölgedeki malzemeyi eritmek daha zordur (Bystronic 1996).

2.2.1.7. Isıdan Etkilenen Bölge

Lazer alevli kesme ve lazer fizyon kesme, kesilecek malzemenin kenar bölgelerinde değişikliğe yol açar.

Aşağıdaki tablo malzeme kalınlıklarına ve metalin cinsine göre ısıdan etkilenme derinliklerini gösterir.

Çizelge 2.1 Lazer kesimdeki ısıdan etkilenme derinliği (Bystronic 1996).

MALZEME KALINLIĞI (mm)	ISIDAN ETKİLENMİŞ BÖLGE (mm)		
	St 37	Çelik	Alüminyum
1	0.05	0.05	0.10
2	0.10	0.10	0.20
3	0.15	0.15	0.30
4	0.20	0.35	0.40
5	0.25	0.34	0.50
6	0.30	0.55	0.60
8	0.40	0.75	0.70
10	0.50	0.85	-
12	0.60	-	-

Düşük karbonlu çelikler veya paslanmaz çelikleri işlerken ısıdan etkilenen bölgede sertlik düşer. Yüksek karbonlu çeliklerde (Ck60) kenarlarda sertliğin arttığı görülür.

Sıcak haddelenmiş alüminyum alaşımlarda ısıdan etkilenmiş bölgedeki malzeme diğer kısımlara oranla daha yumuşak olacaktır.

2.2.2. Farklı Malzemelerin İşlenebilirliği

2.2.2.1 Endüstriyel Çelikler

Bu tip malzeme oksijen ile kesildiğinde iyi sonuç verir. Lazer CW modunda kullanılır .

Kesme gazı olarak oksijen kullanıldığında kesim kenarı çok az olmak üzere oksitlenir. 4 mm'ye kadar kesme gazı olarak yüksek basınçlı azot kullanmak mümkündür. Kesim kenarlarında bu halde oksit görülmez. Kesme hızı oksijen ile elde edilen maksimum kesme hızının sadece % 10 ile % 30 'una erişebilir.

Daha zor şekilli parçalar için lazer ünitesi darbe modunda çalıştırılır. Bu dar açılı ve ince kesitli bağlantılardaki yanıkları önler.

Çelikteki daha çok karbon ihtivası, kesim kenarlarındaki sertleşmeye ve köşelerde yanık izlerinin oluşmasına neden olacaktır. Sertliğin kesme hızı üzerinde hiç bir etkisi yoktur. Alaşım yüzdesi yüksek olan malzemeleri kesmek fakir alaşımlı malzemeleri kesmekten zordur.

Oksitli yada kumlanmış yüzeyler daha düşük kesme kalitesine izin verecektir.

Malzeme yüzeyinde kalan sıcaklık kesme kalitesine negatif yönde etki eder .

Çelikleri keserken gerilmelerin giderilmesi önemlidir. Saf olmayan çelikler deki köpürme kesme sonucuna büyük oranda etki eder. Haddeme ile oluşmuş iç gerilmelerde kesme işlemini etkiler.

Küçük boyutlu parçalarda ve 15 - 20 mm kalınlıklarda ince tane yapısına sahip çelik tavsiye edilir (Bystronic 1996).

Örneğin :

Reax – 250 – lazer çeliği; bu çelik maksimum %0.03 silikon ve maksimum % 0.012 karbon ihtiva eder. Çekme dayanımı $360- 440 \text{ N/mm}^2$ ye eşittir. Bu çelik aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Lazer kesme sırasında cüruf oluşumunu yok eder.
- Kesilen parçalarda artık yok.
- Optimum büküm
- Geri yaylanma azaltılmış
- Kaynak kabiliyeti yüksek
- Bu çelikten 30 mm kalınlığa kadar mevcuttur .

St 52-3 kullanıldığında artık malzeme ve yapışkan cürufun yarattığı çapaklar gibi ikinci sınıf kesme sonuçları elde edilir.

Endüstriyel çeliği temiz yüzey elde ederek kesmek için, aşağıdaki yönergeler göz önünde bulundurulur.

- $\text{Si} \leq \%0.04$; mükemmel lazer işleme için tercih edilmeli
- $\text{Si} < \%0.25$; bazı hallerde daha az kaliteli kesimler elde edilir .
- $\text{Si} > \%0.25$; çeliğin kalitesi lazer kesme için az uyumlu, daha kötü ve tutarsız sonuçlar elde edilir.

Not: DIN normunda St 52 ye kadar olan çeliklerde $\text{Si} \leq \%0.55$ dir ki bu değer lazer kesim için uygun değildir.

2.2.2.2. Paslanmaz Çelik

Bu malzemeyi kesmek için; eğer oksitli kenarlar önemli değil ise, oksijen ile başka bir müdahaleye gerek kalmadan oksitsiz ve çapaksız bir kesme için azot ile yüksek lazer gücü kullanarak, yüksek basınçlı azot ile aynı kalınlık için oksijen kullanarak elde edilen kesmeden daha hızlı kesim elde edilir.

5 mm'den itibaren tüm tabla yüzeyindeki paslanmaz çeliği azotla çapaksız kesmek için, odak pozisyonunun ayarı gerekmektedir. Odak noktasının yeniden ayarı ve kesme hızının azaltılması temiz kesme yapabilmeyi mümkün kılar.

Plaka üzerinde yağ film tabakası oluşturmak işleme kalitesini azaltmadan başlangıç deliklerindeki sonucun daha iyi olmasını sağlayacaktır.

Paslanmaz çelik için: Başlangıç delik ve kesme için aynı nozul mesafesi kullanılır.

Oksijen ile kesme: 5 mm sac kalınlığı için düşük hızda ve darbe modunda kesim yapılır (Bystronic 1996).

2.2.2.3. Alüminyum

Alüminyum ve alaşımlarının sürekli modda kesilmesi tavsiye edilir. Çok yüksek yansıtma özelliğine ve ısı transferine rağmen alaşım ve lazer gücüne bağlı olarak 6 mm'ye kadar olan plakalar kesilebilir.

Alüminyum hem oksijen hem de azot ile yüksek basınç altında kesilebilir. Kesme gazı olarak oksijen kullanılması, yüzeyin pürüzlü olmasına, az fakat temizlenmesi zor çapak oluşumuna neden olur.

Azot ile kesme yüzeyi daha temiz olur. 4 mm'ye kadar olan uygulamalarda optimum regülasyon sağlama ve çapaksız kesme elde etmek mümkündür. Daha kalın parçalarda temizlenmesi zor çapaklar oluşacaktır.

Saf alüminyum yapıları nedeniyle kesmek daha zordur. Yüksek alaşım oranlarında malzemeyi kesmek daha kolaydır (Bystronic 1996).

2.2.2.4. Titanyum

Titanyum saclar argon ve azot kesme gazları ile kesilebilir. Krom-nikel parametreleri kullanılabilir (Bystronic 1996).

2.2.2.5. Bakır ve Pirinç

Her iki malzemede çok yüksek yansıtma seviyesine ve çok iyi ısı iletkenliğine sahiptir (Bystronic 1996).

Pirinç ancak 3 mm' ye kadar azot ile kesilebilir. Bakır ancak 3 mm' ye kadar kesilebilir ve kesme gazı olarak oksijen kullanılmalıdır.

2.2.2.6. Sentetik Malzemeler

Sentetik malzeme olarak; termoplastik, termoset malzemeler ve sentetik kauçuk malzemeler işlenebilir. PVC ve polietilen malzemelerden lazer işlemede çok yoğun duman çıkmasından dolayı bu malzemeler için su jeti kullanılmalıdır.

Akrilik cam lazer ile kesilebilir. Kesme gazı olarak basıncı 0.5 bar dan daha düşük olmak üzere azot kullanılır. Bu yolla daha parlak kesme yüzeyi elde edilir (Bystronic 1996).

2.2.2.7. Organik Malzemeler

Tahta ,deri ve kağıt lazer ile kesilebilir. Kesim kenarı yanmaktan kömür haline gelecektir (kahve rengi). Daha yüksek hız ,daha az karbonlaşma demektir. Yapışkanlı tahta keserken, her yapışkanın tipi ve çeşidine bağlı olarak temiz bir kesme garantisi etmek imkansızdır (Bystronic 1996).

2.2.3. Lazer Parametreleri

Lazer parametreleri aşağıdakileri içerir:

- Dalga boyu
- Işın kısmındaki yoğunluk dağılımı
- Lazer ışın polarizasyonu
- Işının ayrılması
- Işın çapı, iş parçası üzerindeki kırılması ve odak pozisyonu




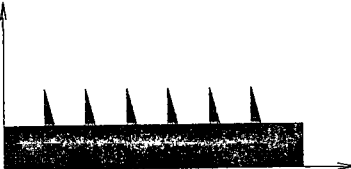
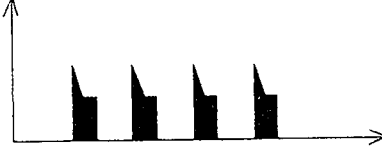
- Lazer gücü
- Mod tipi

Lazer dalga boyu polarizasyonu ve odak pozisyonu, lazer ışımalarının iş parçası tarafından absorbe edileceği noktaya gelmesine karar verir. Lazer modu (lazer ışımındaki yoğunluk dağılımı) (Çizelge 2.2.), lazer gücünün bir fonksiyonudur. Farklı lazer modelleri ile elde edilen mod değerleri çok farklıdır, bundan dolayı kategorilere ayrılırlar.

Işının açılmasından ve ışının en dar noktasının çapından, odak noktasındaki ışının çapı elde edilir. Işının çapı, makine üzerindeki mercek sistemlerinin odak uzunlukları ile birlikte lazer ışımını odaklayabilme imkanı veren bir parametredir.

Eğer ışın uzatma (Beam expansion) sistemi kullanılıyor ise odak çapı, uzatma faktörü kadar azaltılabilir. Işın odak çapı uzunluğu ışın çapına ve kesme mercek sisteminin odak uzunluğuna bağlıdır (Bystronic 1996).

Çizelge 2.2 Lazer modları (Bystronic 1996).

Mod	Grafik Gösterimi	Uygulama	Örnek
Sürekli Mod		Düşük Basıncılı Kesme Normal Kesme Yüksek Basıncılı Kesme	DKP O ₂ İle Alüminyum N ₂ İle Paslanmaz N ₂ İle Sabit Güç İle Hassas Kesme Elde Edilir
Modülasyon Mod		Köşeleri Kesme Hızlanma Ve Durma	Aktif Modülasyonda Lazer Gücü Eksen Hızına Ayarlanır. Böylece Sivri Köşelerdeki Yanık İzlerinden Kaçınılır
Normal Puls Np		Delme İnce Saclardaki Hassas Konturlar	DKP Sac Üzerindeki Başlama Delikleri Küçük Delikler Hassas Delikler
Süperpuls Sp		Delme Yüksek Yansıtma Özelliğine Bağlı Malzemeler	Bakır N ₂ İle Paslanmaz O ₂ İle
Megapuls Mp		Delme Kalın Saclarda Hassas Konturlar	Kalın Malzemelerde Az Artık İle Hızlı Delme O ₂ İle Çinko Çeliği

2.2.4. Gaz Parametreleri

Gaz parametreleri aşağıdakileri içerir :

- Gaz tipi
- Gaz basıncı
- Nozul çapı
- Nozul geometrisi

Gaz basıncı ve nozul geometrisi kenarların düzgünlüğünü ve çapak oluşumunu etkiler.

Kesme gazı tüketimi nozul çapına ve gaz basıncına bağlıdır. Kesme uygulamalarında gaz basıncı düşük basınç için 5 bar, yüksek basınç için ise 20 bar'a yaklaşır .

Kullanılan nozullar dairesel ağız açıklığına ve gittikçe incelen konik yapıya sahiptir. Mümkün olduğu kadar nozul ile iş parçası arasındaki mesafeyi korumak gereklidir. Daha çok mesafe kesim bölge genişliğini etkileyecek daha yüksek gaz tüketimine neden olacaktır. 0.5 ile 1.5 mm arasındaki mesafeler sıkça kullanılır (Bystronic 1996).

2.3. Malzeme İşleme

Bu bölümde teorik faktörler ve pratik deneyimler, lazer ışığı vasıtasıyla malzeme işleme ile ilişkilendirip raporlanmıştır. Tarif edilen ısı transfer sonuçları ile ilgili birçok hesaplama modeli sunulmuştur. Seçilen lazer tipinin etkisi, ışın karakteristikleri ve optik sistemin proses performansı üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bu faktörler lazer proses ekipmanlarının dizaynı için temel oluşturur. Ayrıca bu bölümde mümkün olan bazı pratik deneyimler tarif edilecek, kesme ve delme gibi bazı uygulamalardaki problemler tarif edilecektir.

Burada lazerin karakteristiklerini proses aracı olarak tartışacağız ve prosesin genel tiplerinde lazer parametrelerinin etkilerini açıklayacağız. Bu prosesleri gerçekleştirmek için prensipler kurmaya çalışacağız. Böylece çalışanlar ve otoritelerin bulduğu deneysel

ilerlemelerin analitik prensiplerle dönüşümünü gerçekleştireceğiz. Ek olarak lazer prosesinin karakteristiklerinin başarı ile uygulandığını düşündüğümüz tarzdaki birçok özel uygulamaları tanıtacağız. Uygulamaların listesi aydınlatıcı olabilir fakat bu tam değildir. Uygulama, ekonomik olarak uygun değil ise lazer prosesinin ekonomisini özel olarak ele almaktan kaçınacağız.

Bu bölümde malzeme çeşitliliğine göre lazerin enerji kaynağı olarak kullanıldığı uygulama sınıfları tanıtılmıştır. Bu tanıtıma eritme, delme, işleme ve malzemede kimyasal yada yapısal değişiklikler elde etmek için kontrollü ısıtma gibi özel prosesler ilave edilmiştir.

2.3.1. Lazer Prosesinde Termal Etkenler

2.3.1.1. Lazer Isıtma Modeli

Lazer uygulama tiplerini lazerin termal enerji kaynağı olarak kullanıldığını hesaba katarak açıkladık. Malzeme işlemede lazer parametrelerinin etkileri üzerine çalışmak için lazer ışınının absorbe edilmesinin sonucu olarak malzemenin ısıtılmasını inceleyeceğiz.

Işın, yüzeydeki ince bir katman tarafından absorbe edilir ve daha sonra termal enerji taşıma ile malzemenin iç kısımlarına transfer edilir. Isıtma oranı, ısı akışı tarafından belirlenir. Genelde yüzeydeki optik akış yoğunluğu yüzeyden yansıtılan ışıdan daha düşüktür. Isı akışı genellikle optik akış yoğunluğunun $(1-R)$ katıdır. Burada R yüzeyin yansıtıcılığıdır. Yeterli derecede yüksek ısıtma oranlarında yüzey erir ve fizyon içlere doğru yayılır. Kaynak uygulamaları kontrollü biçimde belirlenen derinliğe ulaşmak için fizyonun yayılmasına ihtiyaç vardır.

Daha yüksek ve uzun süreli ısıtma ile yüzeyde buharlaşma meydana gelir, erimiş malzemenin çıkışına eşlik eder. Yüksek ısıtma oranları büyük buharlaşma, yüksek hızda parlak buhar, partiküller ve bazen potansiyel olarak zararlı gerilme dalgaları yayılmasını sağlar. Dikkatin dağılması püskürmeye neden olur. Bu olaylar yüzeyden yüksek enerjili iyonların ve elektronların yayılmasına sebebiyet verir. Buhar yoğunluğu öyle büyük olur ki buhar tarafından absorbe edilen lazer ışını, yüzey tarafından absorbe edilenden daha fazla

olur. Weichel ve Avizonis buharın genişlemesinin ve büzülmesinin, ışınının absorbe edilmesinin sonucu olduğunu ileri sürerler.

Her şeyden önce düşük ısıtma oranlarından endişe edilmelidir. Aksi halde yüksek enerji gerektiren bir takım prosesler gerçekleşmeyebilir. Kaynak yada delme işlemleri belli seviyede ısı akışına ihtiyaç duyarlar, bu seviyenin altındaki hallerde plazma oluşumuna sebep olur. Bununla beraber bu uygulamalardaki yüzey sıcaklığının, erime sıcaklığına ulaştığındaki ısı dağılım bilgisi proses için gerekli parametrelerin değerlendirilmesini olanaklı kılmak için yeterlidir.

Bu yüzden iş parçasının ısıtılması üzerinde çalışmak için klasik ısı transfer modellerini kullanabiliriz. Şunu da belirtmeliyiz ki en yüksek ısıtma oranlarına lazer proses uygulamalarında karşılaşıyoruz. Sıcaklık artışı 10 ps'de gerçekleşir. Bu süre tipik kafes vibrasyon periyodu olan 10^{15} Hz ile karşılaştırıldığında hala uzundur (Cohen 1969).

2.3.1.2. Analitik Davranış

Lazer parametrelerinin etkilerinin ana noktalarını elde etmek için ideal olarak kabul edilmiş birçok ısı transfer modeli denenmiştir. Malzemenin termal özellikleri ısıtma süresince sabit kaldığı varsayılır. Ayrıca iş parçasının yüzeyinden çevreye olan radyasyonla ısı yayılımı ihmal edilir. Kütlenin sıcaklığı 2000 °C olduğunda radyasyonla olan ısı kaybı 10^2 W/cm² civarında olur. Bu değer 10^5 W/cm² 'lik ısı akışı ile karşılaştırıldığında küçüktür ve genelde pulslu lazerler için kullanılır. Sürekli lazer uygulamalarında ısıtma süreleri uzundur, ışınlama ısı kaybı, kayda değer bir biçimde yüksek olabilir. Bununla beraber büyük miktarlardaki alanın sıcaklığının yükselmesi ısı kaybına katkıda bulunur. Lazerin lokal ısıtmada kullanılmasından buyana bu hadiseler pratik olarak çok fazla gerçekleşmemiş ve böyle eğilimler görülmemiştir (Cohen 1969).

2.3.1.2.1. Yarı Sonsuz Gövdelerin Sabit Isı Akışı İle Isıtılması

Hedef yüzeyden geçişi, uniform ve zamanla değişmeyen H ısı akışı malzemenin esas kısmının ısıtılması için model olarak kullanılabilir. Aşırı sıcaklıklar için çözüm $v(x,t)$, burada t zaman, x ise yüzeyden içeriye olan penetrasyon derinliği olarak verilmiştir (Carslaw and Jaeger 1959b).

$$v(x,t) = \frac{2H}{k} (\kappa t)^{1/2} \operatorname{ierfc} \frac{x}{2(\kappa t)^{1/2}}, \quad (1)$$

Burada κ ısı yayılama ve k ise iletkenlik katsayısıdır .

Yüzeydeki sıcaklık ($x=0$) iken

$$v(0,t) = \frac{2H}{k} \left[\frac{\kappa t}{m} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Verilen enerji girişi $E=Ht$ için yukarıdaki denklem görülür, ısı akışının artışı veya denkleminde yüksek yüzey sıcaklığı elde edilirken puls süresi kısalır. Puls süresinin kısalması ile birlikte istenen yüzey sıcaklığını elde etmek için gerekli enerji miktarı azalır, yüzeyin daha etkili ısınması yüksek pik gücüne sahip puls ve pulsun kısa süreli olması ile mümkün olur.

Isıtma bu şartlar altında daha lokal olarak uygulandığında denklem (1)'e göre termal penetrasyon derinliği $X=(4\kappa t)^{1/2}$ olur. x , X den çok fazla büyük olduğunda denklem (1)'deki hata fonksiyonu 0'a yaklaşır, x 'in değeri için kayda değer bir ısı artışı görülmez. Kısa ısıtma süresi yüzeyin çevresindeki ısı artışını sınırlandırır. Bu malzemenin ana kısmının sıcaklığını arttırmadan yüzeyin ısıtılması için istenen bir özellik olabilir fakat kaynak dikişi gibi kayda değer penetrasyon istenen uygulamalarda zorluklar yaşanabilir.

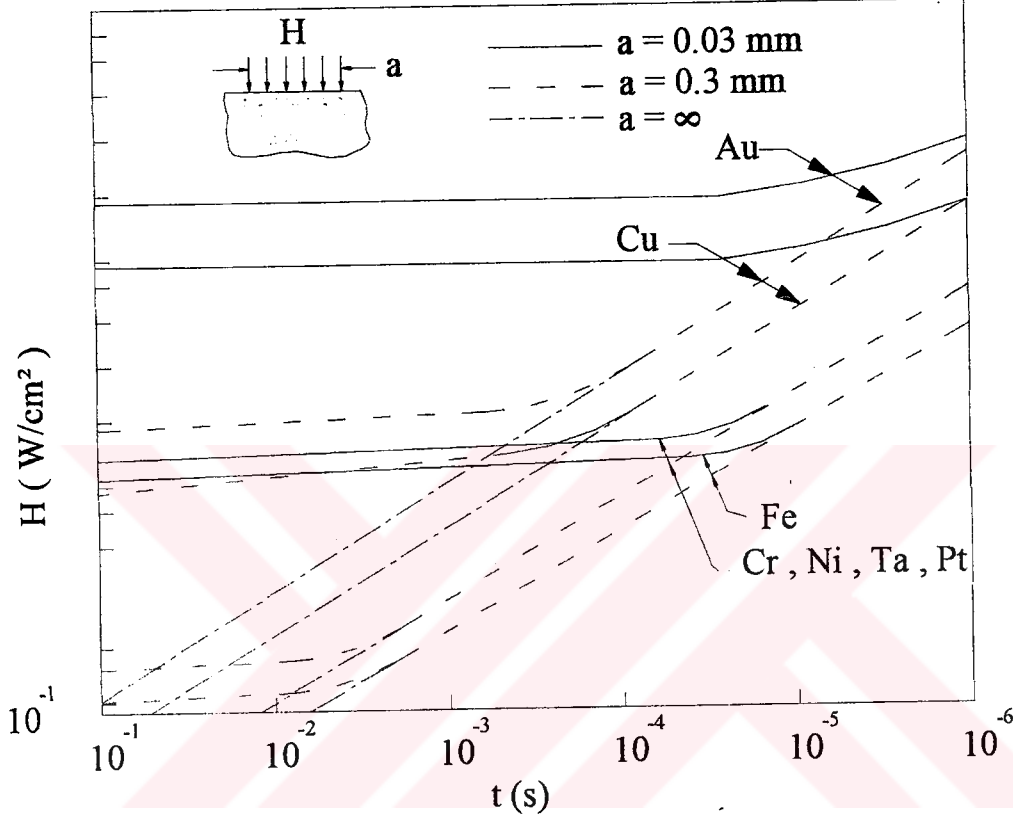
Isı akışı H sadece yüzeyin bir kısmına iletildiğinde, çemberin yarı çapına a dersek, yüzeydeki en yüksek sıcaklık dairenin merkezinde olur (Carslaw and Jaeger 1959b)

$$v_m = \frac{2H(\kappa t)^{1/2}}{K} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{a}{2(\kappa t)^{1/2}} \right] \quad (3)$$

Tek boyutlu şartlar (denklemler), parametre $a/2(\kappa t)^{1/2}$ birle karşılaştırıldığında büyük olurken dağılımın merkezine yaklaşır .

Birçok pulslu lazer uygulamasında odak noktası 0.1 mm 'den büyük olur, puls süresi birkaç saniyeden ve termal difüzyon miktarı $10-40 \text{ m}^2/\text{s}$ ' den az olur. $\operatorname{ierfc} < a/2(\kappa t)^{1/2}$ şartı

bundan dolayı ihmal edilebilir ve odak noktası sıcaklığı tek boyutlu termal faktörlerden hesaplanabilir. Şekil 2.2 de verilen süre için odak noktası sıcaklığını ergime noktasına getirmek için gerekli lazer akış yoğunluğu hesaplanmasında kullanma amacıyla uygulama sonuçları gösterilmiştir. Bu sonuçlar yakut lazeri için sunulmuştur ve bu sonuçlar diğer lazerlerin dalgaboyunda yansıtma katsayısı tarafından düzeltilerek kullanılabilir.



Şekil 2.2 : Yarı sonsuz katı yüzeyini eritmek için gerekli yakut lazeri akış yoğunluğu zamana bağlı olarak tanımlanmıştır. Akış yarı çapı a olan daire üzerinde uniform olarak dağılır (Carslaw ve Jaeger 1959b).

Rykalın ve Krasulin (1966) ısı kaynağı için odak noktası sıcaklığını yarıçapın fonksiyonu olarak hesaplamıştır.

$$H(r) = H_0 \exp(-nr^2) \quad (4)$$

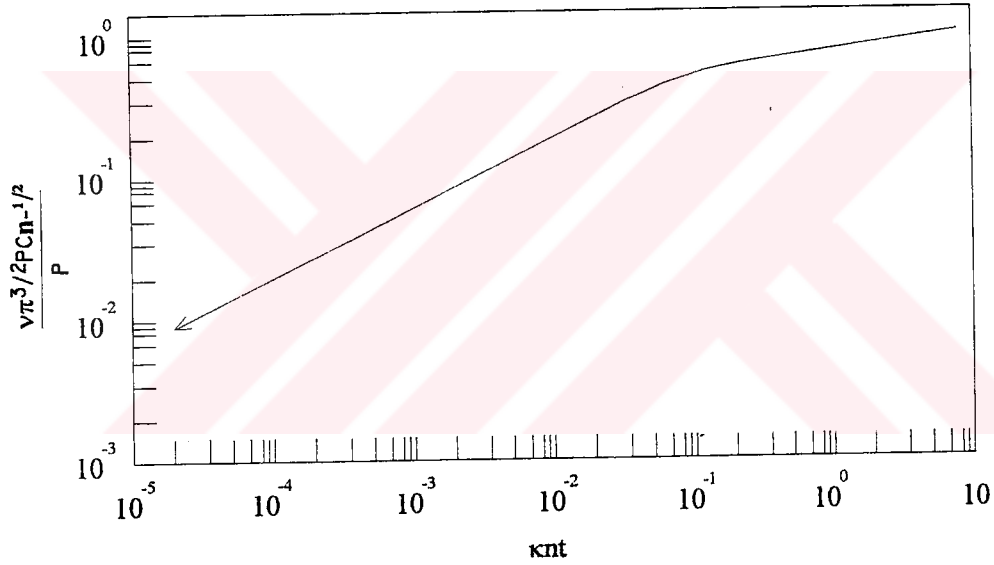
Burada n dağılım faktörüdür. n faktörü H $n=1/a^2$ ifadesi tarafından H_0/e 'ye düşürüldüğünde yarıçapa bağlı olur. P ' nin süresinde çözüm elde edilmiştir. Yüzeyle iletilen toplam güç denklem 5 teki gibi olur.

$$v(r,z,t) = \frac{2P}{\rho C(4\pi\kappa)^{1/2}} \int_0^t \frac{1}{(t_0+t)\sqrt{t}} \exp\left[\frac{-z^2}{4\kappa t} - \frac{-r^2}{4\kappa(t+t_0)}\right] dt \quad (5)$$

Burada t_0 termal zaman sabiti, $t_0 = 1/4Kn$ ve $P = H_0\pi a^2$ 'dir. Isıtılan merkezindeki sıcaklık denklem 6 daki gibi olur.

$$v(0,0,t) = \frac{P}{\pi\rho C(4\pi\kappa t_0)^{1/2}} \arctan(t/t_0)^{1/2} \quad (6)$$

Bu hesabın birkaç sonucu Şekil 2.3'de gösterilmiştir .



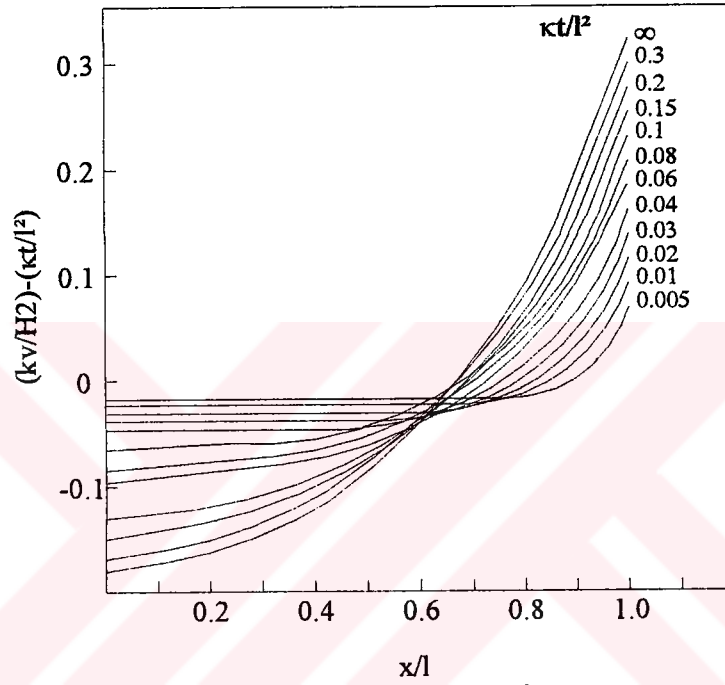
Şekil 2.3 : Yarı sonsuz gövde üzerindeki ısı akışının gauss dağılım merkezindeki yüzey sıcaklığı; u_m , güç; P , $H = H_0 \exp(-nr^2)$ dağılımında $P = H_0\pi/n$ şeklindedir (Rykalın ve Krasulin 1966) .

2.3.1.2.2. Sabit Isı Akısı İle Sonlu Kalınlıktaki Tabakanın Isıtılması

Hedef malzeme sonlu kalınlığa sahip olduğunda (1) , uniform ısı akışı dağılımı için sıcaklık aşağıdaki ifade ile verilir .

$$v(x,t) = 2H(Kt)^{1/2} / k \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \text{ierfc}\left(\frac{(2n+1)l-x}{2(Kt)^{1/2}}\right) + \text{ierfc}\left(\frac{(2n+1)l+x}{2(Kt)^{1/2}}\right) \right\} \quad (7)$$

Burada ısı akışı $x=l$ iken verilmiş ve yüzey ($x=0$) izole edilmiştir. Carslaw ve Jaeger (1959c) sıcaklık dağılımının zaman ve pozisyona bağlı olarak düzeltici süre ile beraber doğrusal olarak arttığını göstermişlerdir $Ht/\rho Cl$. Düzeltici süre Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 : Kalınlığı l olan tabakanın $x=0$ da ısı akılı olmadığı, $x=l$ iken uniform ve sabit H ısı akışı olduğu durumda sıcaklık değişimi (Carslaw ve Jaeger 1959c).

Yüzey sıcaklığı denklem 7'den elde edilebilir.

$$v(0,t) = Ht/\rho Cl - Hl/k \left\{ 1/3 + 2/\pi^2 \sum_{n=0}^{\infty} 1/n^2 \exp(-\kappa n^2 \pi^2 t/l^2) \right\} \quad (8)$$

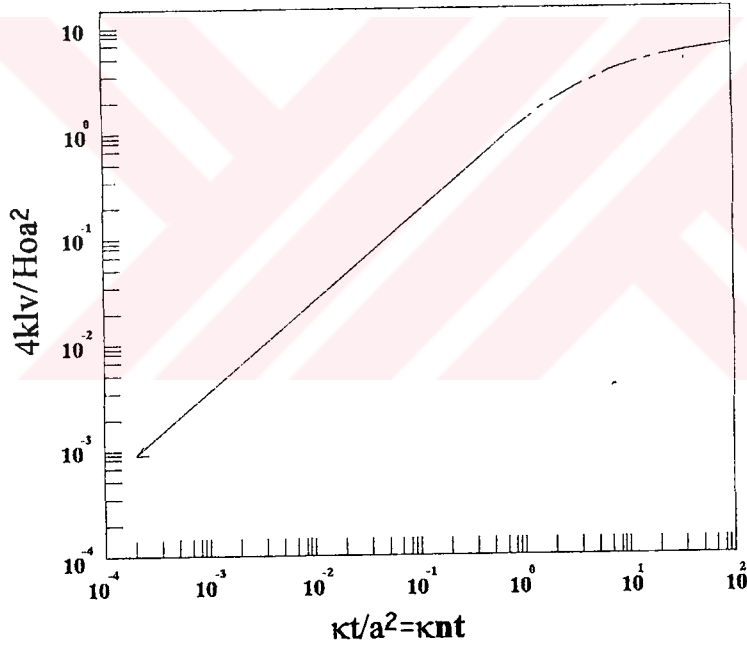
Yarı sonsuz gövdeler için $(\kappa t/l^2)$ 'nin bir veya birden küçük olduğu yüzey için çözümlerde, sıcaklık sanal olarak seçilemez. Eğer $l^2 \geq \kappa t$ şartı tatmin edici ise tabaka kalınlığı ısı kalınlık olarak hesaba katılabilir. $l^2 \leq 1/3 \kappa t$ için tabakanın izole edilmiş sıcaklığı %10'dan daha az koşulu ile ısıtılmış yüzey sıcaklığından farklıdır. Tabaka için bu şart tatmin edici olduğunda ısıl olarak ince denir.

Sac metallerin delinmesi ve kaynatılması uygulamalarının ortaya çıkmasından sonra ince tabakaların ısıtılması problemi pratikte oldukça önem kazanmıştır. Lin (1967) yarı çapı a olan dairesel bir alan üzerine uygulanan uniform ısı akışı H problemini çözmüştür. Sıcak noktanın merkezindeki sıcaklık

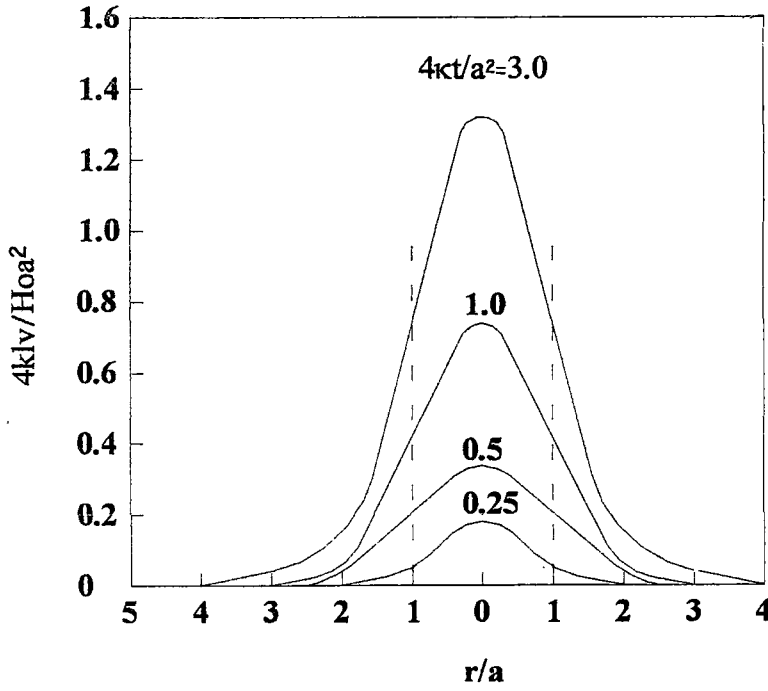
$$v(0,t) = \frac{Ha^2}{4kl} \left[\frac{4\kappa t}{a^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] - \text{Ei}\left(-\frac{a^2}{4\kappa t}\right) \right] \quad (9)$$

Burada l sac kalınlığı ve E_i hata fonksiyonudur. İnce sac üzerine ısı akışı dağılımı için çözüm Lin (1967) tarafından elde edilmiştir. Denklem 4'e tarif edilen ısı girişi için sıcak nokta sıcaklığını Lin aşağıdaki şekilde göstermiştir.

$$V^*(0,t) = \ln(1 + 4\kappa t/a^2) \quad (10)$$



Şekil 2.5 : Kalınlığı l olan sac metalde ısı akışı gauss dağılımının merkezindeki sıcaklık. Isı akışı $H = H_0 \exp(-r^2/a^2)$ (Lin 1967).



Şekil 2.6 : Kalınlığı l olan sac metalde ısı akışı gauss dağılımı için radyal pozisyonun fonksiyonu olarak sıcaklığın değişimi. Isı akışı $H=H_0\exp(-r^2/a^2)$. $4\kappa t/a^2 < 0.25$ değeri için sıcaklık dağılım şekli ısı girişininkiyle aynı olur (Lin 1967).

Burada v^* boyutsuz bir sıcaklık $v^* = 4\kappa lv / Hoa^2$ 'dir.

Sıcaklık dağılımı

$$v^*(r,t) = -Ei \left[-\frac{(r/a)^2}{1 + 4\kappa t/a^2} \right] + Ei \left[-(r/a)^2 \right] \quad (11)$$

Denklemlerle verilir. Bu denklemde r , radyal pozisyonu gösterir. Şekil 2.6 te denklem 10'un sıcak nokta sıcaklığı için sonuçlarını gösterir. Şunu da belirtmeliyiz ki yüzeye olan toplam enerji iletim oranı ($H\pi a^2$) dairesel gauss dağılımı için aynıdır. 2 dağılım ile tabakanın ısıtılmasının etkisini karşılaştırabiliriz. $4\kappa t/a^2 < 1/2$ için sıcak nokta sıcaklığı üzerine hedefin özel olarak ısıtılması tarafından belirlenen dağılımın kayda değer etkisi yoktur. $4\kappa t/a^2$ nin daha büyük değerleri için dairesel dağılım ile daha yüksek sıcaklıklar elde edilir ve bu (Lin 1967) gösterir ki $4\kappa t/a^2 > 10$ için gauss dağılımı için dairesel dağılıma göre istenen sıcaklığı elde etmek için %65 daha fazla zamana ihtiyaç vardır.

2.3.2. Lazer Prosesinin Diğer Yönleri

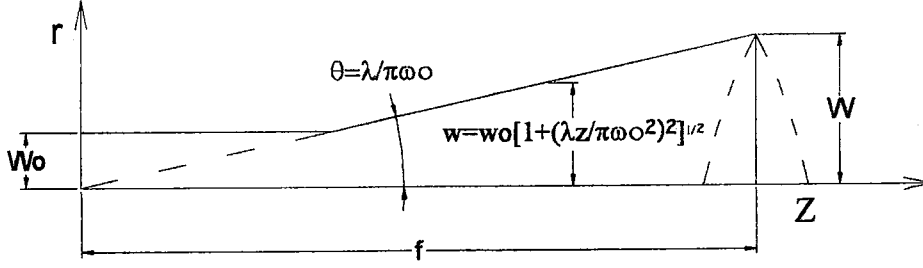
Bu bölümde lazerin proses aracı olarak kullanılmasını etkileyen ısı olayları dikkate alacağız. Lazer ışını iş parçasının yüzeyine ısı kaynağı olarak uygulanmadan önce birçok dönüşümler geçirmek zorundadır. Işın optik sistem tarafından yüzey üzerine odaklanır, sonuçta ortaya çıkan yüzeydeki ısı akışı ışının moduna, optik sistemin karakteristiklerine ve iş parçasının ısıtılırken içinde bulunduğu atmosfere bağlıdır. Bu ve diğer faktörleri ayıracağız.

2.3.2.1. Mod Ve Nokta Büyüklüğü

Lazer Proses uygulamaları için, enine mod yapısının öneminin tartışılması, son dönemlere kadar pratik olarak çok fazla değeri yoktu. Yüksek güçlü puls lazerleri ki bunlar yakın dönem lazer araçları kuvvetli multimod çıkışa sahip olanların ortaya çıkmasından sonra modların önemini ortaya çıkarmıştır. Malzeme prosesi için uygun lazerlerin sürekli geliştirilmesi bununla beraber bu lazerlerin genellikle temel enine modlarda yada diğer saf modlarda çalıştırılması için lazerler yapılmıştır. Alçak modların birçok avantajı vardır. Alçak modlarda verilen lens odağı için küçük noktalar elde edilir, verilen nokta büyüklüğü için odak derinliği fazla olur ve ışını optik olarak kullanmak kolaydır. Yüksek modlarda istenen büyüklükte nokta elde etmek için çok sayıda boşluğu olan lenslere ihtiyaç duyulur. Lensin çalışma ölçüsü yetersiz yada fiziksel olarak boşluğu aşırı olabilir. Multimod ışınlarda ayar gerekli olduğunda çalışmak zordur, tüm modlarda eş zamanlı olarak ayarlamak mümkün değildir.

Lazer modlarının detaylı davranışı birçok otorite tarafından verilmiştir (Boyd and Gordon 1961, Fork et al. 1964, Kogelnik 1965). Yüzeyde oluşan ısı akısı yoğunluk dağılımına bağlıdır ve bu yüzden bazı ısı dağılım kontrolleri belirli modlarda daha kolay olur.

TEM₀₀ için yoğunluk maksimum değerinin $1/e^2$ 'si mertebesine radyal koordinat w iken düşer. Yarı çapın büküm noktası w_0 'dan bu ışının yayılması (Kogelnik 1966) tarafından verilmiştir.



Şekil 2.7 : w_0 yarıçapının büküm noktasından TEM₀₀ modunun yayılımı (Kogelnik 1966).

$$w = w_0 [1 + (\lambda z / \pi w_0^2)^2]^{1/2} \quad (12)$$

Burada z büküm noktasından aksenal mesafe ve λ ışının dalgaboyudur. z 'nin herhangi bir değeri için herhangi bir rotasyonel simetrik modda yoğunluk dağılımı (TEM_{p1}) $l(r)$ denklem 12'de yerine konularak elde edilebilir (φ rotasyonel koordinattır).

$$L(r) = l_0 [(r\sqrt{2}/w)] L_p^{-1}(2r^2/w^2) \exp(-r^2/w^2) 2 \cos^2 l(\varphi - 90^\circ) \quad (13)$$

Burada L_p^{-1} genelleştirilmiş çok değerli bir Laguerre 'dir .

$$L_p^{-1}(x) = (e^x x^{-1}) / p! (d^p / dx^p) (e^{-x} x^{p+1}) .$$

Şekil 2.7 hangi modun uzayda nasıl yayıldığını gösterir ve lens tarafından odaklanan ışını tanımlamak için kullanılabilir. Uzak alan açısı θ lensin ışın yolu üzerindeki yeri için gereklidir (bu durum için sağdan geliyor). Nokta yarıçapının odak yüzeyindeki sonucu

$$w_0 = \lambda / \pi \theta = f \lambda / \pi w , \quad (14)$$

burada lensteki ışının yarıçapı w ve lens odak boyu f 'dir. Bu denklem genelde nokta büyüklüğünü gauss ışınının odaklanmasının sonuçlarında tahmin etmek için kullanılır.

Yüksek modların yayılımı w 'nin yakın değerleri ve denklem 12'deki z 'nin herhangi bir değeri için hesaplanarak incelenir ve denklem 13'de yerine konur. Lensin odak yüzeyindeki yoğunluk dağılımı bu mantıkta belirlenir. Şekil 2.7, verilen lensin yüksek modlar için artışıyla, nasıl nokta büyüklüğü elde edildiğini gösterir. Ek olarak bütün yüksek modlu ışınları kabul etmek için delik boşluğu w artmalıdır. Multimod ışınlar için puls katı esaslı lazerlerdeki gibi yaklaşım.

$$r_0 = f \theta_0 \quad (15)$$

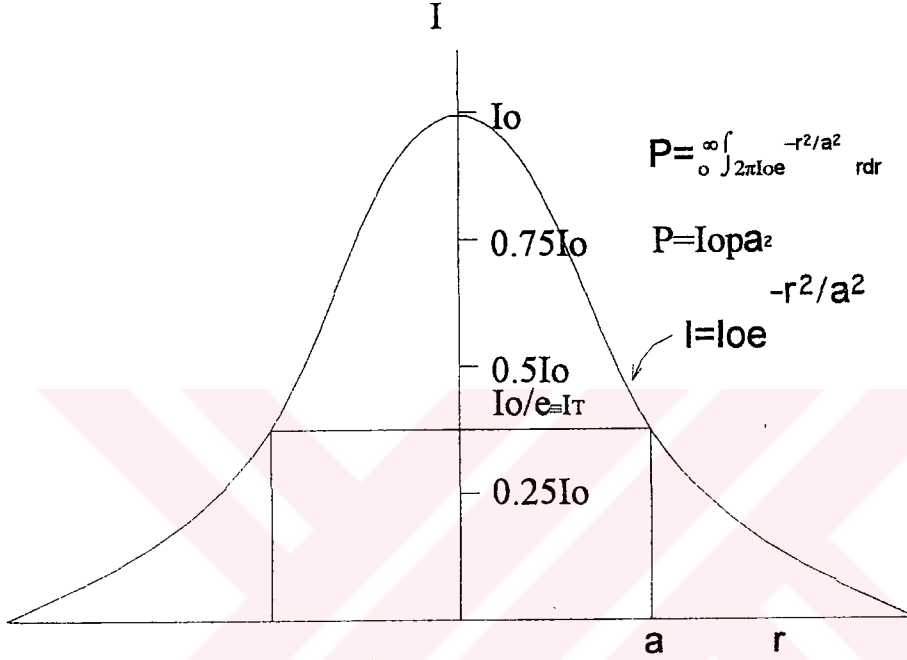
kullanılır, burada r_0 odak noktasının yarı çapı ve θ_0 ışının divercens açısı (yarım açı) lense yaklaşır.

Denklem 12 ışın için odağın derinliğinin hesaplanmasına izin verir. Odak derinliği iş parçası yüzeyinin uniformluğu ve odak düzgünlüğü gerektirmesinden bu yana proses uygulamaları için önemli hale gelmiştir. Eğer z 'nin sınırları gibi odak derinliğini rasgele belirlersek ışın yarıçapı w_0 'dan %10'dan fazla değişmediği durumda denklem 12'den

$$z = \pm 0.46 \pi w_0^2 / \lambda \quad (16)$$

Odak derinliği modlar için diğer temellere göre bundan az olabilir. Yüksek modlar için odak derinliğinin gerçek hesabı z 'nin fonksiyonu olan yoğunluk dağılımı şeklinden bu yana zordur. Odak noktasının büyüklüğünün ölçümü zor ve karışık angarya olabilir. Nokta film üzerine fotoğraflanabilir ki bu çizgisel olarak yoğunluğu karşılar. Yoğun konturlar film üzerine çizilebilir ve şiddetli konturlara filmin bilinen kalibrasyon sabiti vasıtasıyla dönüştürülebilir. Q-switched yakut lazeri ışının uzaysal yoğunluk dağılımı mantık çerçevesi içerisinde belirlenir. Noktayı tarayarak yoğunluk dağılımının deneysel olarak belirlenmesinde ölçümler tam olur, fakat üretim ortamında hatta laboratuarda yapılan uygulamalarda dahi işlemin yerine getirilmesi çokta elverişli değildir. Basit bir alternatif değişik tipteki filmler üzerinde delikleri yakmak buharlaştırmaktır. Nokta ve yoğunluk dağılımı hakkında başlangıç ölçüleri kullanışlı bilgiler sağlayabilir. (Cohen and Epperson 1968) tantal film üzerinde nokta buharlaştırmak için kullanılan özel bir yakut lazeri ile

ortalama güçteki lazer pulsu ve buharlaştırılan noktanın büyüklüğü arasında birebir uyuma olduğunu gösteren araştırmalar yapmışlardır. Puls süresi ve pompalama seviyesinin nokta büyüklüğüne kayda değer bir etkisi yoktur. Verber ve Adelman (1965) ince taneli film ile bir yakut lazerinin odak noktasını fotoğraflamışlardır. Onlar filmi sisten uzak tutmak için ışını zayıflatmak zorundaydılar, fakat yoğunluğun sınırını imaj büyüklüğünü değiştirmeden daha fazla hafifletebilmeyi bulamadılar.



Şekil 2.8 : Gauss dağılımı ile işlemenin rakamsal olarak gösterimi (Cohen and Epperson 1968).

Noktadaki yoğunluk dağılımı gittikçe zayıflayan ışık ve buharlaştırılan(metalik ince filmde) noktanın büyüklüğünün ölçümü tarafından belirlenir. Bu tekniğinin kullanımı nokta çapının ölçülmesinde inandırıcı seviyede doğruluk için hatırı sayılır dikkat gerektirir. Optik ve güç seviyesi yeterince büyük genellikle zor nokta üretmek seçilmiş olmalıdır. Basit ince bir filmin ölçüm prosedürü Gauss ışın dağılımı için tıpkı TEM_{00} modunda olduğu gibi kullanılabilir . Yoğunluk dağılımı $I=I_0 \exp(-r^2/a^2)$ şeklinde yazılabilir. Burada a parametresi yoğunluğun maksimum değer I_0 'ın $1/e$ 'si kadar olduğunda r'nin değeri kadar olur. (Şekil 2.8) Dağılımdaki toplam ışınım gücü $P=I_0 \pi a^2$ şeklinde gösterilir. Bu birçok gauss dağılımın ince filmde aynı ölçüde buharlaştırılmış nokta üretebileceğini gösterir. Bununla beraber dağılım faktörü a'nın istenen nokta yarıçapına eşit olduğu dağılım en az ışınım gücü harcayarak bu ölçüde nokta üretilebilir. Çeşitli metalik ince filmlerin işleme başlangıcına bu

mantık içerisinde Q-switched YAG lazeri karşılaştırılmadan Gauss ışını ile karar verilmiştir. Işın tek bir pulsla ancak buharlaştırılabilir filme kadar zayıflar ve güç zayıflamayı ortadan kaldıran E faktörü tarafından artırılır. Sonuç noktası yarıçapı a , gücün ölçüsü, tamamen belirlenmiş dağılım filmleri işlemek için başlangıç yoğunluğunun hesabını mümkün kılan I_T 'dir. Bu mantıkta I_T 'yi belirleyen filmin özellikleri a 'nın faktör 3 ile değiştiğinde tecrübe ile görülmüş I_T değerinde dikkate değer bir değişiklik oluşmamıştır.

İşlenmiş nokta ölçüsü ile gauss dağılımının $1/e$ noktasını karşılaştırma metodu toplam gücü minimize etmek istendiği uygulamalar için kullanışlıdır. Benzer metotlar yüksek modlar için planlanabilir. Bazı uygulamalar için bundan dolayı nokta kenarı ve merkezdeki yoğunluk arasındaki e fark faktörü aşırı olabilir. Bu lazer ile ısıya duyarlı levhalardan ince filmler kaldırılacağı yada lazer kaynağından büyük eriyik havuzları yayıldığı zaman sorun olabilir. Sonraki problem ise istenen ergime penetrasyonuna ulaşmadan noktanın merkezinde yüksek pik gücü yüzey kaynamasına sebep olur. Hassas tabakalar üzerindeki ince filmler için merkezdeki sıcak nokta tabakaya zarar verebilir. Bu problemde hedefi işlemek yada eritmek için başlangıçta güç seviyesini ayarlamak daha kabul edilebilir, I_0 ' a yakın olur. Sadece dağılımın uniform merkezi proses için kullanılır.

2.3.2.2. Optik Sistem

Ek olarak genel kriterlerden memnuniyet için herhangi bir optik sistemin dizaynına giriş, lazer prosesinde kullanılan sistem yüksek optik yoğunluğa, yoğunluğu azaltmadan dayanabilmelidir. Birkaç watt'a kadar ortalama güç sürekli pompalamalı lazerlerde ucuz akromatik mikroskop mercekleri özellikle kullanışlıdır. Birçok mercek pulslu katı esaslı lazerler ile düşük güç uygulamalarında kullanılabilir. Fakat güç başlangıçtaki alçak seviyeyi biraz aşınca birkaç pulsta zarar görebilir. Örneğin; 1ms yakut pulsunun, 0,1 J. Yüksek güç yada büyük boşluk gerekliliği küresel ışın kırıcı için iyi düzeltilmiş çift akromatik kullanımı ile karşılanır. Hava boşluklu çiftler genelde çimentolu çiftlere göre daha dayanıklıdır. Germanyum yada tuz lensler $10,6 \mu\text{m}$ CO_2 lazeri ile kullanılır ve bunlar küresel saptırıcılar için düzeltici ile kullanıma hazırdırlar.

Lazer uygulamaları için herhangi bir lens sisteminin seçimindeki önemli bir faktör çalışma boşluğudur. İş malzemesinin buharlaşması yada erimeden dolayı oluşan sıçrama eğer lensler hedef noktaya çok yakınsa lensleri hızla bozabilir. Kabul edilebilir çalışma

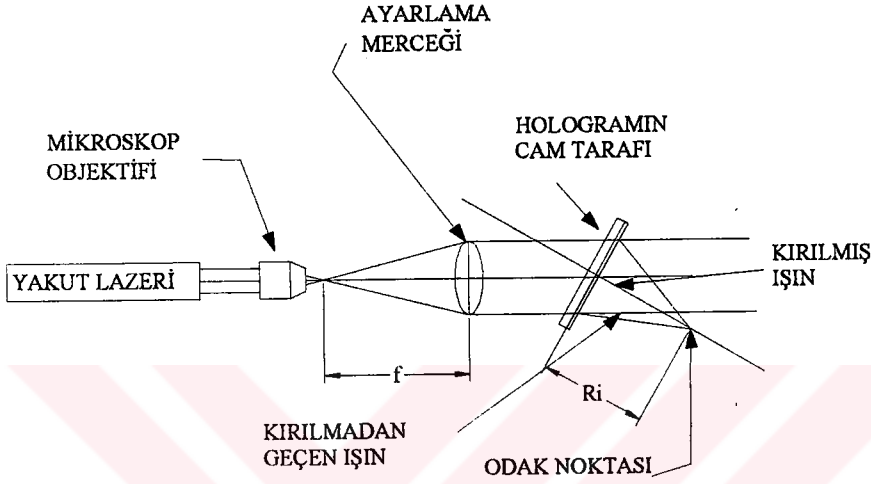
boşluğu uygulama ve güç seviyesine bağlıdır. Birçok ince film işleme uygulaması için birkaç watt'a kadar olan ortalama güç seviyelerinde birkaç mm yeterlidir. Fakat pulslu yada CO₂ lazerleri ile delme ve işleme uygulamalarında 5 cm çalışma boşluğuna ihtiyaç duyulur. Sarf edilebilir plaka yada transparan filmler ile lenslerin mekanik olarak korunması faydalı olabilir.

Lazer proses uygulamaları için özel sistem yada uygun bir lens bulmak çoğu zaman zordur ve sistemlerin dizaynı için maliyetin doğrulandığı özellikle üretim uygulamaları için önemli fikirler verilmelidir. CO₂ lazeri ile saç malzemedan büyük çemberler kesmek için CO₂ lazer ışınını ince halka şekline getiren özel mercekler imal edilmiştir (Barber ve Lin 1969) ve tek bir lazer pulsu ile birleştirme kaynağına izin veren bir dizi silindir lensler imal edilmiştir (Gagliano and Carr 1969).

Lazer ışınının odaklanması için tek ve potansiyel olarak kullanışlı yaklaşım hologram ile odağın yer değiştirmesidir. Hologram lens gibi kullanılabilir ve konvansiyonel kırıcı lensler için ucuz bir değiştirme sunar, özel durumlarda isteğe bağlı dizaynlar yada büyük boşluklar gelir hologramlar göreceli olarak ucuz ve bir gün kadar kısa süreli fabrika çevrim zamanına sahiptirler. Hologramların sıra halinde lensler gibi rol oynama kabiliyeti vardır ve bu suretle kompleks desen ve çoklu nokta şekillerine izin verirler. Lazer ile devre kartı çizmek için lehim ile birleştirmede (O'hara and Tencza 1969) hologramın yüzey üzerinde olmayan odak noktası üretme kabiliyeti üzerinde çalışılmıştır.

Moran (1971a) lazer malzeme prosesi için hologramların kullanımı üzerinde kapsamlı çalışma yapmıştır ve düşük mod çıkışı için pulslu yakut lazeri ve onun boşluğuna öncelikli çaba sarf etmiştir. Holografik lenslerin noktalar ve metal filmde 14µm kadar küçük nokta dizisi işlemek için kullanılabileceğini göstermiştir. Cam plakalar üzerinde bikromat kaplanmış %30 mertebesinde ışın kırma etkinliğine sahip jelatin hologramlar kullanılmıştır. Lazerin holograma zararı problem değildir, yüksek güçlü lazerler için bile 1ms puls süreleri ölçülmüş başlangıç emülsiyon zararı 20J/cm²'dir. Hologramlar argon lazeri ile beraber yapılır, şeklin kırma miktarını minimize eden şekilde tekrar yapılandırılır ve optimum kayıtları hesaplayan bir bilgisayar programı ile dizayn edilirler. Program maksimum verimliliği sağlamak Bragg etkileşim şartlarına uyacak şekilde yeniden yapılandırılarak modifiye edilmiştir (Moran 1971b).

Şekil 2.9 Moran tarafından üzerinde çalışılan yeniden yapılandırma geometrisinden birini göstermektedir. Bu problemde mikroskop objektifi hologramın boşluğunun avantajını kullanmak için ışını genişletmekte kullanılır. Odak mesafesi R_i 25 cm ve hologram $1/11f(=D/R_i)$ şartında çalışır.



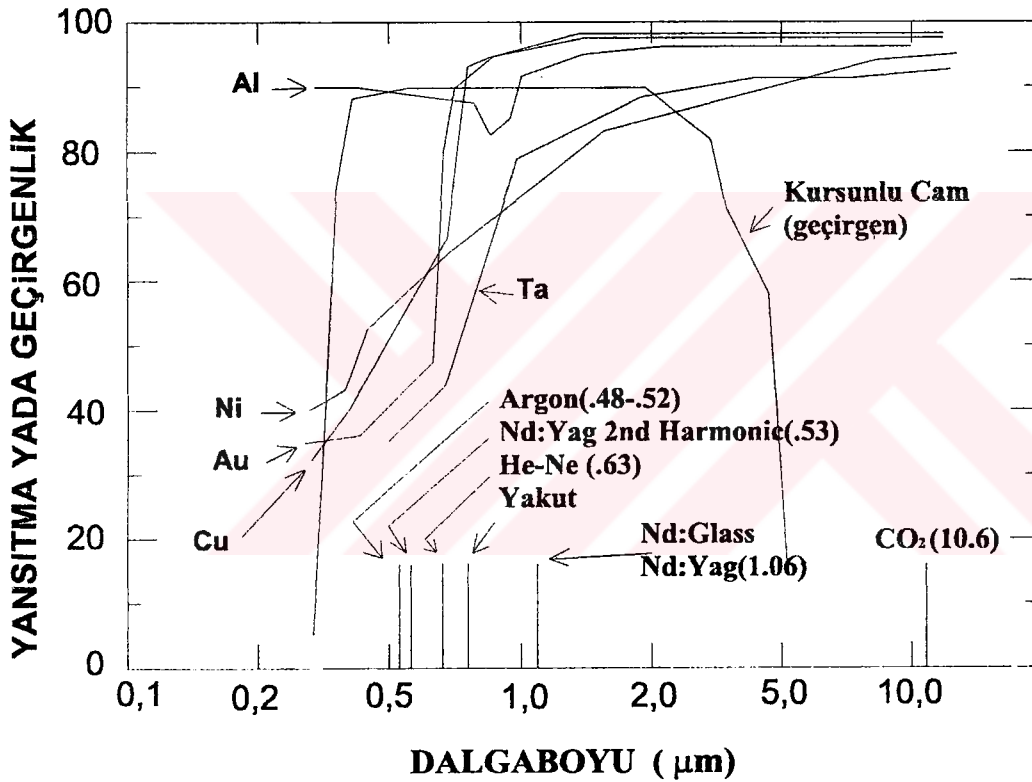
Şekil 2.9 : Holografik lens sistemi için konstrüksiyon geometrisi (Moran 1971b).

Bu sonuçlar pulslu yakut lazeri ile elde edilmesinden sonra özellikle ilginç hal almıştır. Kayıt ışımına yakın olan tek mod ışın için çözünürlük ve ışın kırılma etkinliği kırıcı lensler ile hologramın etkinliğinin karşılaştırılmasına yetecek kadar yüksek olmalıdır. Holografik lens minimum ışın dağılması için dizayn edilir, lazer ışını odaklamak için optik sistemde bir hayli esneklik sağlar.

2.3.2.3. Yüzey ve Atmosfer Şartları

Hedef yüzey tarafından absorbe edilen lazer enerjisinin miktarı yüzeyin optik ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Yansıtıcıların değeri absorpsiyon verimliliğine kılavuzluk etsin diye çizelgelenmiş ve şekil 2.10' de bir çok malzemeye ait değerler çizilmiştir. Birçok metal kısa dalga boyunda absorbe etmeye uygundur ve bu nedenle görünür lazerler ile, kızıl ötesi lazerler ile olandan proses uygulamaları için daha az lazer gücüne ihtiyaç duyulur.

Hedefin eritildiği ve buharlaştırıldığı uygulamalar için bununla beraber çizelgelenmiş yansıtıcılar absorbe edilen ve ısıya dönüşen lazer enerjisinin miktarının düşünüldüğünden daha az dayanıklı olduğunu gösterir. Şekil 2.10'daki veriler oda sıcaklığındaki verilerdir; ve sıcaklık ile mümkün yansıtıcı değişimlerini içermez (İş parçasının ısıtılması gibi). Ek olarak absorbe edilme atmosfer yada buhar ile etkileşerek yüzey eridiğinde beklenmedik şekilde artar. Buharı şekillendiği önceden bilinebilen delme uygulamaları sırasında yapılandırılır. Yüzey aslında siyah bir gövde gibi davranır (Ready 1965). Belki de buharın saçılmasının ve yüzeye yakın yerde ışığı yakalamasının sonucu gibi (Schwarz and de Maria 1962).



Şekil 2.10 Birkaç çeşit metalin dalgaboyunun fonksiyonu olarak yansıtıcılığı (Ready 1965).

Birçok lazer uygulamasında iş parçasının yüzeyi lazer puls süresinin sadece kısa bir parçasında katı ve yansıtıcı olarak kalır, oda sıcaklığında hesaplanan yansıtma değerleri hatalı sonuçlar verir (Şekil 2.10). Birkaç otorite tecrübe ve hesaplanmış sonuçlar arasında güzel bir anlaşmaya varıp yüksek yansıtma özelliğine sahip metallerde bile yansıtıcılığı komple ihmal etmişlerdir (Ready 1965a). Diğer taraftan yansıtıcılık enerjisi oldukça kullanışlı bir kılavuz vazifesi görür. Şekil 2.10 altın filmi buharlaştırmak için gerekli başlangıç enerjisinin devre kartı için gerekli olandan 1.6 μm ile 0.53 μm dalga boyları için

12 kat yüksek olacağını ön görür. Seramik tabaka üzerindeki 1 µm kalınlıktaki altın film üzerinde tekrarlı Q switched YAG lazeri ile yapılan deneylerde temel dalga boyu ve ikinci harmonik arasındaki 4 farkın bir faktör olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 2.10'ya referans olarak cam tabakadan metal filmi kaldırılması gösterilebilir. Tabakadaki zarar minimum da tutulmak istendiğinde CO₂ lazerine göre daha kısa dalga boylu lazerler daha beceriklidir.

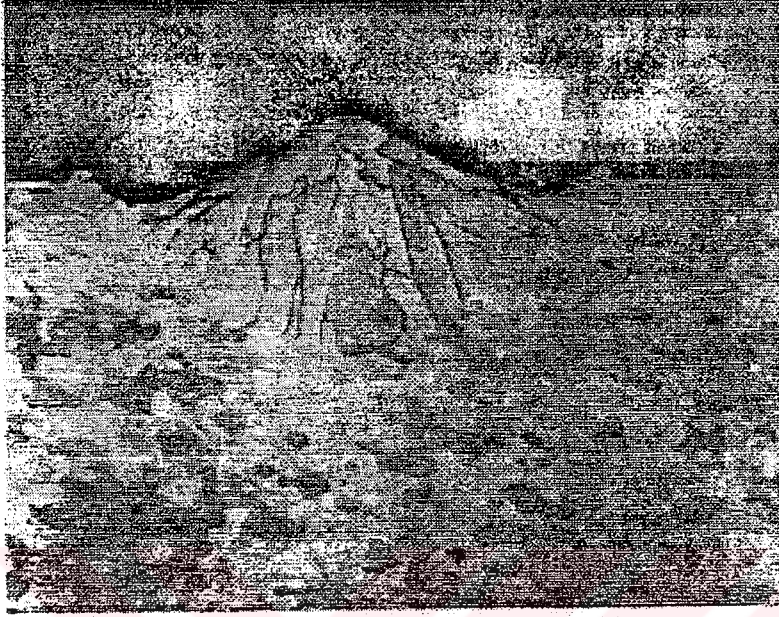
Hedefin yüzey şartları ve atmosfer hedef ısıtıldığında ikisinin de ışının absorbe edilmesi olayındaki etkisi bilinir. Bu olay Cohen and Epperson (1968) tarafından gösterilmiştir. İşlenmiş bakır ile parlatılmış bakır parça içine olan eriyik havuz penetrasyonun derinliği normal puls yakut ışınımına maruz kalması ile çok çeşitlilik gösterir. Yakut dalga boyuna yaklaşık olarak eşit olan yüzey kalitesi için eriyik penetrasyonu tarafından ölçüle absorpsiyon çok büyüktür. Nikel ile tekrarlanan deneylerde bakıra göre yakut dalga boyunda daha absorbe etmeye uygun, absorpsiyon, yüzey kalitesine karşı hassas değildir.

Bakır ve Nikel yüzeylerinin normal puls yakut lazeri tarafından ısıtılması esnasında oksijen bulunması absorpsiyonun kayda değer artışı ile gösterilmiştir (Cohen and Epperson 1968). Bu deneyler son zamanlara kadar tekrar edilmiş, bununla beraber 200ns puls süreli Q-Switched YAG lazeri ile ve atmosferin etkisini ortaya çıkarmaz . Q-switched puls süresi basitçe herhangi bir oksitlenmeye izin vermek için çok kısadır. Diğer taraftan zaman ölçeğinin sonu, sürekli CO₂ lazerleri ile kesme deneyleri yüzey oksidasyonu için proses hızının birçok metal çeşidi için önemli bir faktör olduğunu ortaya çıkarmıştır (Arata et al. 1969 , Asmus and Baker 1969).

Yüzeydeki kimyasal etki eriyik havuzunun katılma geometrisini etkileyecek şekilde yüzey gerilmelerinde değişikliğe sebep olabilir. Konik çıkıntı genelde bakırda normal yakut puls tarafından şekillendirilen eriyik havuzunda elde edilir, yüzey inert gazla ısıtıldığında döküm molibdende eğri gözükmez (Cohen and Epperson 1968) (Şekil 2.11).

Lazerle ısıtılmış yüzey ile çevresi arasındaki etkileşim CO₂ lazer uygulamalarının sac metal, kalın malzemeyi kesme ve delmeyi içeren büyük kısmında önemli yer tutar. Bu uygulamalarda oksijen jeti ile lazer tarafından ısıtılan metal yüzeyi üzerinde odaklanır. Titanyum gibi reaktif metallerin olduğu durumlarda ısınma miktarı yeteri kadar arttığında ekzotermik reaksiyon meydana gelir. Plazma arkı ile işleme gibi daha konvansiyonel

metotlarda mukayese edildiğinde titanyum gibi metaller için lazer-oksijen jeti yüksek oranlarda kesme ve delmeyi cazip hale getirir (Bod et al. 1967).



(b)

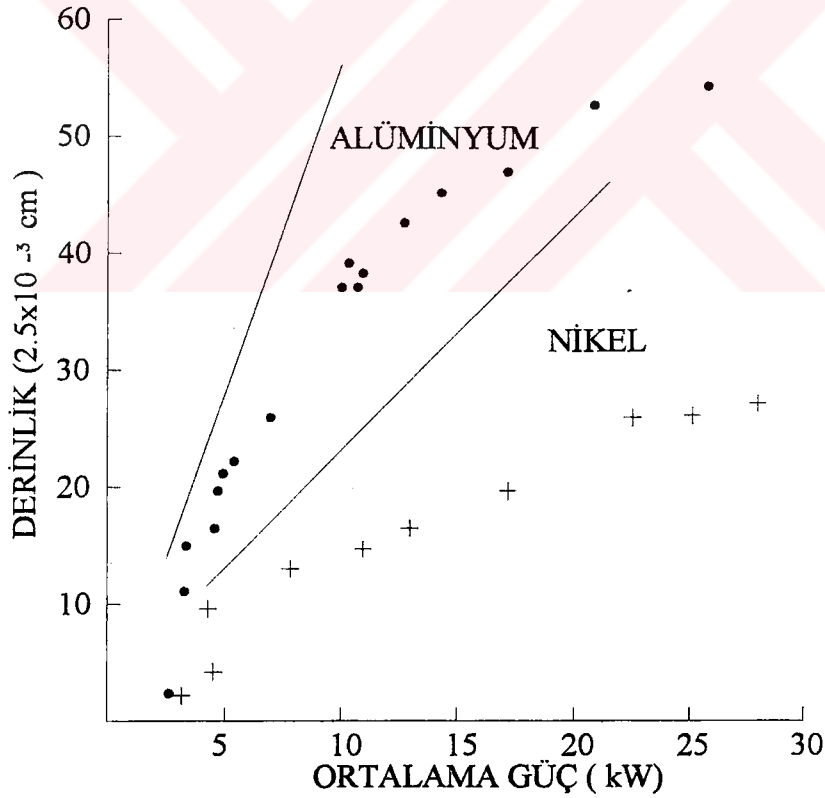
Şekil 2.11 : Döküm molibden üzerinde yakut lazer pulsu ile oluşturulan eriyik havuz geometrisine atmosferin etkileri . a) Havada eritilmiş .b) Argonda eritilmiş (Cohen and Epperson 1968)

Çizelge 2.3 Lazerlerin kullanım alanları (Cohen 1969).

Lazer	Dalgaboyu (mm)	Operasyon modu	Güç (W)	Puls tekrar oranı	Puls süresi	Uygulama	Yorum
Yakut	0,643	Normal puls	2×10^5	Düşük	0,2-5 ms	Tek bir pulsta büyük malzeme kaldırma, elmas delme, nokta kaynağı	Genelde Çoklu puls uygulamaları için ekonomik değildir
Nd-glass	1,06	Normal puls	2×10^5	Düşük	0,5-10 ms	Tek bir pulsta büyük malzeme kaldırma	Genelde ekonomik değildir
Nd-YAG	1,06	Sürekli	200	-	-	Kaynak	Az yer kaplar, Düşük güçlerde ekonomiktir.
Nd-YAG	1,06	Tekrarlı	10^4 pik	5000	200 ns	Elektronik kart imalatı	Az yer kaplar, Ekonomik
		Q-switchli	10 ortalama	-	-	Organik maddelerin kesilmesi, Oksijen ile metal kesilmesi, kırılan malzemelerin çizilmesi	Yüksek güçlerdeki çok hacim kaplar, Düşük güçlerdeki çok ekonomiktir
CO ₂	10,6	Sürekli	375	-	-		
		Tekrarlı	75000 pik	400	50-200 ns	Direnç kesilmesi (Elektronik)	Çok hacim kaplar fakat ekonomik
CO ₂	10,6	Q-switchli	1,5 ortalama	-	-		
		Superpulsu	100 ortalama	-	10-100 mm	Kaynak, delik imalatı, çizme	Çok hacim kaplar fakat ekonomik

2.3.4. Lazer İle Delme, İşleme ve Kesme

Delme ve diğer buharlaştırma yöntemleri genellikle kaynak yada eritme yöntemlerine göre daha kolaydır. Çünkü lazer enerjisinin yüzeydeki eriyik havuzunu kaynama noktasında tutmak için alt ve üst sınırlar içerisinde tutmak gereklidir. Tablo 1 'de malzeme parametreleri H_{2tm} , H_{2te} , lazer puls süresi ile kararlı hale getirilmiş eriyik derinliği ve bu sınırlar içerisinde çalışma aralığı verilmiştir. Buharlandırmada penetrasyon derinliği sadece termal penetrasyon derinliğine bağlı değildir. Fakat öncelikle iş parçasını olan enerji aktarımı üzerinde ve kesin geometrik faktörler kısaca ele alınacaktır. Genelde puls lazeri ile delerken yada işlerken lazer puls süresinin olabildiğince kısa ve kaldırılacak malzemenin hacmi ile orantılı olması istenir. Sürekli lazer ile bu sonuçlarda delme için ısı faktörleri temel alınır; yüzey ile çalışma ortamı arasındaki kimyasal reaksiyon malzeme kaldırma mekanizmasına önemli katkıda bulunabilir (Arata et al. 1969 Asmus and Baker 1969).



Şekil 2.12 : 0.65 mm nokta büyüklüğünde ve 0.8 ms puls süresi ile bir yakut lazeri ile nikel ve alüminyumda üretilen delik derinliği (Arata et al. 1969 Asmus and Baker 1969).

$$S=V(t-t_m) \quad (17)$$

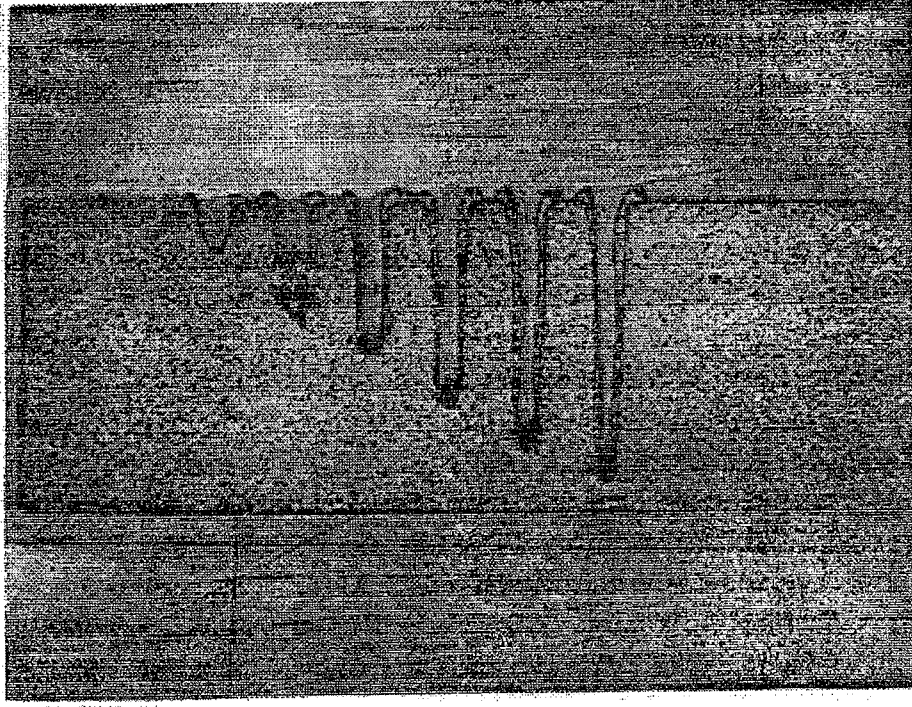
$$v(r,z,t)= \int_{t_m}^t \frac{f(t)}{\rho[Lf+Le+C(v_e - v_{\infty})]} dt \quad (18)$$

Denklem 17 puls lazeri tarafından oluşturulan delik derinliği için kılavuz olarak kullanılır. Şekil 2.12'de 0.8 ms odaklı, 0.6 mm nokta büyüklüğüne sahip yakut lazer ışını tarafından oluşturulmuş delik derinlikleri gösterilmektedir. Denklem 17 tarafından tahmin edilen buharlaştırma derinliği de bu şekilde gösterilmiş ve sadece kaba ölçüler ile buharlaştırma derinliği gösterilmiştir. Yapılan kabul denklem 17' un bir artış mantığında gerçek lazer puls şekli için uygulanması yada nokta büyüklüğüne eşit yada ondan az delik derinliği için denklem 17 ve 18 uygulamalarının sınırlandırılması tarafından düzeltilir. Ne olursa olsun tek bir puls ile ulaşılan delik derinliğinin bir üst limiti vardır. Malzeme buharının ışık geçirmez olmasının etkilerinin sonucu lazer enerjisinin daha fazla absorbe edilmesidir (Ready 1965a). Yüksek güçlü pulslar ve Q-switched pulsu tarafından buharlaştırılan malzeme miktarı limit faktörü ile bu şartlar daha sert hale gelir. Buharlaşan malzemenin geri tepme momentumu tarafından şok dalgalar yardımı ile dökme demirde derin delik üretimi (Haun et al. 1965) tarafından ileri sürülmüştür. Tartışmanın temel bölümü delikten metal buharlaştırmak için gerekli enerjiden pulsun hesaplanan enerjisinden dikkate değer biçimde az olmasıdır. Bununla beraber nikel alüminyum için gerçek delik derinliği buharlaştırma modeli tarafından tahmin edilenden azdır. Bu gösterir ki malzeme kaldırma mekanizması gerçekte enerji seviyesi ve malzemeye bağlıdır (Şekil 2.12).

Şekil 2.12 gösterir ki düşük enerjili çoklu puls lazeri ile delik delme tek, yüksek enerjili puls ile derin delik delmeden daha etkilidir. Çok puls ile delik delmede delikler, tek ve yüksek enerjili puls ile açılan deliklerden daha az konik ve düzgün olur (Williams 1965, Gagliano et al. 1969). Lazerle delinmiş deliklerin, geometrik karakteristikleri en iyi delik derinliğinin delik çapına oranı tarafından tarif edilir, delik derinliğinin delik çapına oranı deliğin orta noktasındadır. Delik derinliğinin delik çapına oranı seramikte 25'i geçer (Cohen 1967), fakat birçok metal için limit oran 8 ila 12 arasındadır. Bununla beraber Williams (1965) derinliğin çapa oranını 3 mm paslanmaz çelikte 25 olarak her biri 2.2 J'lük 8 yakut pulsu kullanarak elde etmiştir. Belirli malzemeler için limit oran ışının optik karakteristiklerine ve malzemenin optik termal özelliklerine bağlıdır . Dar birleşme açısı ile

odaklanmış ışın, derin odağa sahiptir ve yüksek derinlik /çap oranı üretmeye eğilimli olur . Düşük termal difüzivite yüksek oran elde edilmesine yardımcı olur. Cohen ve Epperson (1968), Williams (1965), Haun (1968) tarafından ileri sürülen ışık tüpü mekanizması deliklerin neden bazı malzemeler delinirken ışık odak derinliğinden daha derin olduğunu açıklar. Lazer ışınının delik duvarlarında defalarca yansması dar yansıma açılarının optik enerjiyi deliğin dibine doğru yönlendirmesi ile olur. Bu hadise, cam benzeri malzemelerde sabit yansıtıcılığa sahip metallere göre tekrar açılıları ile yansıtıcıda büyük değişikliklerin oluştuğu daha açık görülür. Haun et al. (1968) sürekli CO₂ lazeri ile ağaç kesmede derinlik, çap oranınının 25 civarında olduğunu gözlemlemiştir. Araştırmalar göstermiştir ki delik ışının geometrik şekline uymamaktadır. Fakat, ağacın termal bozulmasından yada başka tip ışık tüpü sonuçlarından olabileceği ileri sürülmüştür. Bununla beraber Spitz (1969) göstermiştir ki süper puls CO₂ lazeri ile uranyumun delinmesi için, deliğin şekli ve derinliği bir çok puls sonrası ışın için sabit yoğunlaşma makul derecede uygundur.

Şekil 2.13'de; derinlik, çap oranını sınırlayan başka faktörler gösterilmiştir. Deliğin dibinden kaldırılan alümina buharı deliğin duvarları boyunca tortu bırakır. Birçok puls sonrası delik tamamen kapanabilir. Tortu oluşmaması için iş parçasına ön ısıtma uygulanması teşebbüsleri genelde başarılı olamamıştır. Çoğunlukla yüksek derinlik, çap oranına sahip delikler, istenen delik çapından oldukça büyük giriş çaplarına sahiptirler. Bu şartlar elektron ışını ile delmede lazer delmedeki kadar iyi şekilde gözlemlenmiştir (Namba and Kim 1964). Birçok otorite lazer ışını yüzeye odaklandığında, daha uniform delikler delindiğini göstermiştir (Gagliano et al. 1969).



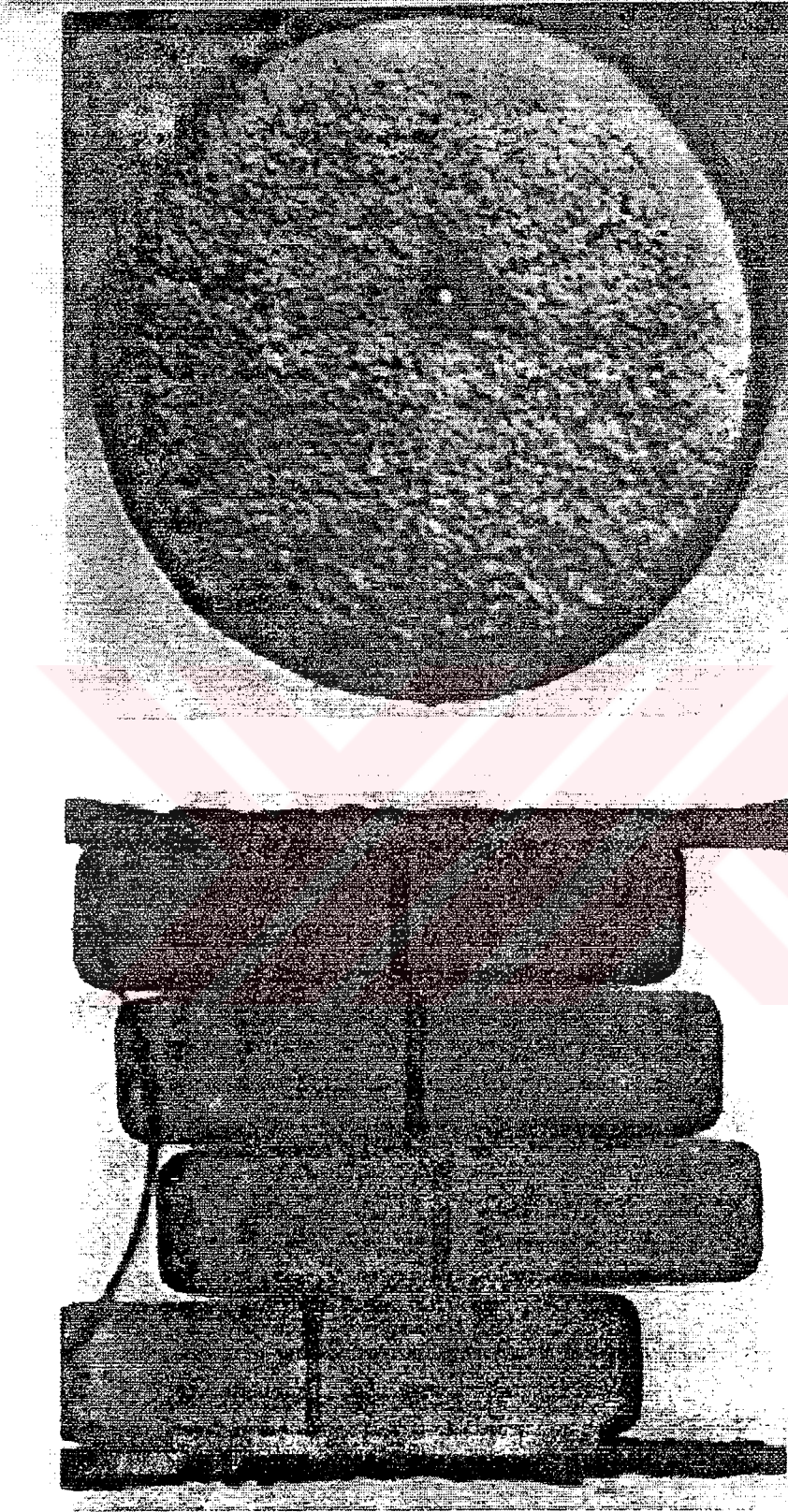
Şekil 2.13 : Yakut lazeri ile delinmiş 0.7 mm alümina seramiğin kesiti, delik duvarında biriken malzemeyi göstermektedir. Delikler 5 ten 30' a kadar artan puls sayıları ile delinmiştir (Namba ve Kim 1964).

Malzeme kaldırma uygulamalarında diğer ekipmanlarla lazerin yapabilecekleri kompleks ve hassas kontrol gerektirir. Buna örnek olarak dönen parçaların dinamik dengeleme uygulamaları gösterilebilir (Smith 1969, Industrial Research 1970). Lazer kullanarak hızlı dengeleme ve dönen parçayı durdurmaya gerek kalmadan malzeme kaldırılabilir. Rotordaki dengesizlik hissedilir ve düzeltme sinyaline dönüştürülür. Bu sinyaller puls lazeri tetikleme devresine gönderilir. Lazer genellikle dengesizlik kabul edilebilir seviyelere düşene kadar otomatik olarak ateşlenir. Bu sistemdeki son değişiklikle bir döner prizma ilave edilmiştir. Böylelikle lazer rotor üzerindeki özel bir noktaya odaklanır. Bu aynı noktaya puls tekrarı yapılmasına izin verir (Industrial research 1970). Süperpuls CO₂ lazerleri aşırı pulslu katı hal lazerlerine göre belirli avantajlar sağlar. Öyle ki yüksek tekrar hızlarında her bir puls için daha küçük miktarlarda malzeme kaldırılabilir ve daha uniform yüzey üretilir. Bir uygulamada 150 pps'te 75 W 'lık süper puls lazerinde 5 dakikadan daha az bir sürede yüksek hızlı rotordardan toplam 20 mg metal kaldırılabilir. Gerekli zamanın büyük bir kısmı rotorun hızlandırılması ve pozisyonlanması için gereklidir (Portnow 1970). Konvansiyonel yöntemler için 15 dakikadan fazlası gereklidir. Lazer

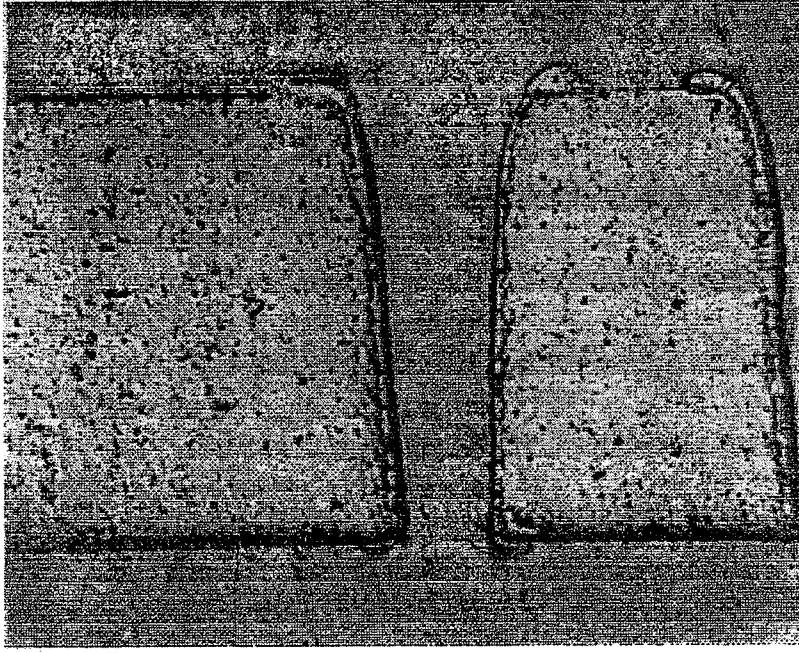
yöntemi tarafından benzer bir uygulamada pulslu bir YAG lazeri saat denge çarklarının hassas ayarı için kullanılır (Laser focus 1970). Sistem çark doğal frekansını ayarlamak için doğal frekans 40 Hz civarındayken geri besleme metodu ve frekans ölçümünü kullanır.

Son zamanlardaki başarılı delme uygulamalarından pulslu yakut lazeri ile değerli taşlarda delik açmaktır. Epperson et al.(1966) elmasları biçimlendirmek için bir yöntem geliştirmiştir. Böylelikle daha büyük çaplı teller kullanılabilir. Brändli et al.(1967) saatlerde kullanılan, yakut taşında eksen deliğinin delinmesi üzerinde çalışmıştır. Her iki uygulamada var olan yöntemlerin maliyetini düşürmekte etkili olmuştur; yakutları ve elmasları abraziv tekniklerle delmek zor ve pahalıdır (Grzywa and Chesko 1966). Konvansiyonel yöntemlerle yakutta delik delme yaklaşık olarak bir dakika alırken lazer yöntemi kullanılmasıyla sn'de on delik açılır. Bir çok pulslu lazer delme uygulamalarında bir delik için maliyet flash lambası maliyetine çok yakındır(Bir puls için 0,01 ile 0,1 cent). Her iki uygulama diğer açılardan da benzerdir. Lazer sadece kaba delik delmek için kullanılır. Son delik şekline abraziv yöntemlerle ulaşılır. Orta hassasiyetlerde abraziv malzemelerin ekonomik oluşu değerli taşları delmek için lazer tekniğinin uygulanabilirliği, yüksek hassasiyetle delik delme kabiliyetine tercih edilir. Şekil 2.14'de yaklaşık 50 µm çapında delikler delinmiş birkaç yakut görülmektedir (Whitehouse1970).

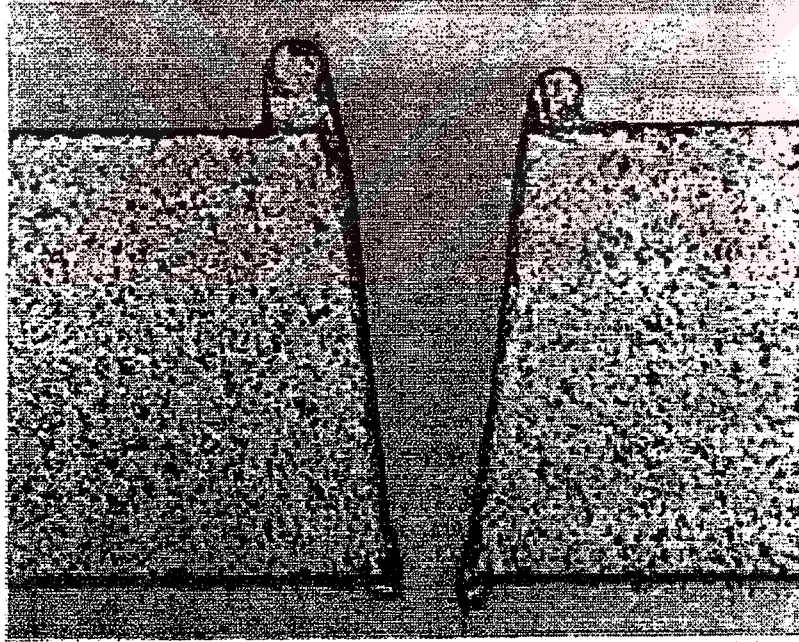
Pulslu lazerler seramik ve yarı iletkenler gibi diğer kırılğan malzemeleri delmekte kullanılmıştır. Mekanik olarak delinemeyen 250 µm kalınlığındaki silikon üzerinde 25 µm çapında ince delikler delinmiştir (Cohen 1967). Silikon malzemeyi kırmadan, silikon malzemenin kenarına 50 µm yakınlıkta delik açılabilir, merkezleme noktaları olarak kullanılabilen bu delikler uniform ve dairesel olurlar. Delik delinmiş alümina kartlar elektronik entegre devre teknolojisi uygulamalarında kullanılmış, seramik, yanmadan delme, zımbalama ile delmeden çok daha ucuz ve hassas şekil delinmiştir. Entegre devreleri birlerine bağlayan metal iletkenleri buharlaştırmak için kartlar kullanılmıştır. İnce delikler (0,6 – 0,8 mm kartta, 25- 50 µm çapında ve boydan boya) devre çiplerini karta göre aşağıda tutmak için vakum deliği olarak kullanılır. Daha büyük çaplı delikler, (200 – 400 µm) metal ile buharlaştırılabilir yada kaplanabilir. Böylelikle kartın bir tarafından diğer tarafına elektrik bağlantısı sağlanabilir. Düşük derinlik çap oranına sahip delikler, tek bir lazer pulsu ile delinebilir (örneğin; 300 µm delik için 4 J, 1,5 ms).



Şekil 2.14 : Pulsu yakut lazeri ile delinmiş yakut saat parçaları; Elde edilen uniformluk ve tekrarlama kararlılığı görülmektedir. Delik çapı yaklaşık 50 μm dir (Whitehouse 1970) (Courtesy of Raytheon Manufacturing Company).



(a)



(b)

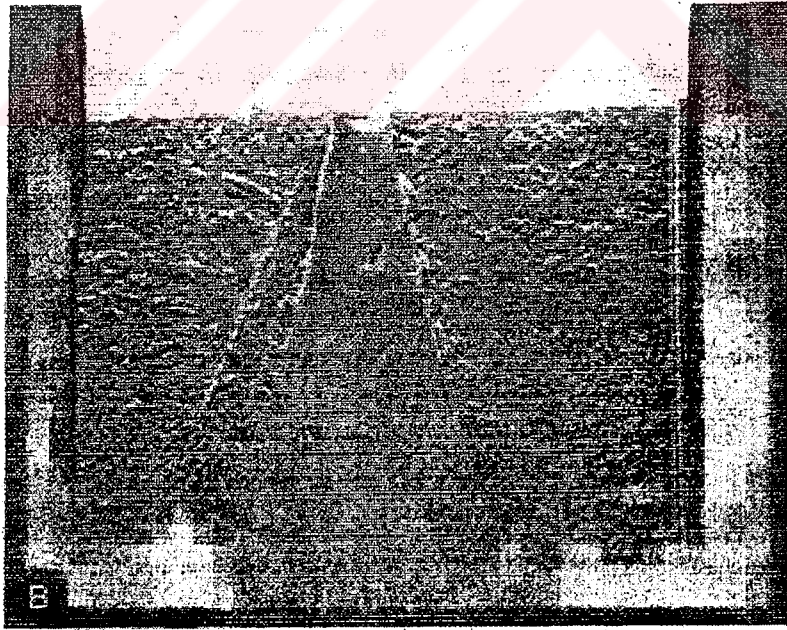
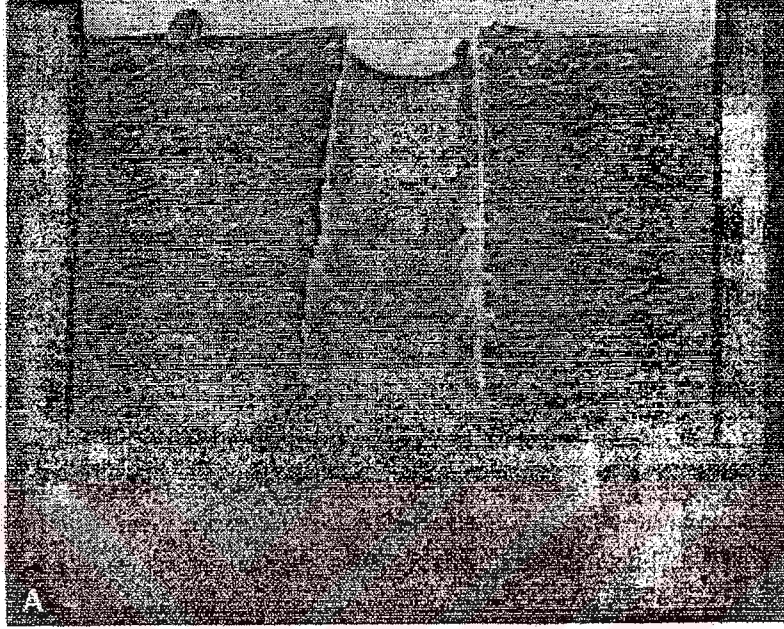
Şekil 2.15 : Süperpuls CO₂ lazeri ile delinmiş 0.7 mm kalınlığında Alümina seramik parça (Melone 1970).

Son zamanlarda seramik kartları delmek için CO₂ lazeri kullanımı yaygınlaşmıştır. Yüksek güçlü (250 W) sürekli lazerler 200 µm çıkış ve 40 µm giriş çaplı delik delme için kullanılır. Delme işlemi 7-10 ms ışın temas süresine ve eriyik alüminayı deliğin içinden uzaklaştırmaya yardımcı hava jetine ihtiyaç duyar. Süper pulslu lazerlerde, seramik delmek için kullanılabilir. Bu tip lazerlerin kısa süreli yüksek gücün (0 – 100 µs, 20 kW) patlamasında iş parçasına enerji aktarımı konusunda avantajı vardır, fakat bunların cw lazerlere göre ortalama güçleri daha azdır. Şekil 2.15’de 65 W süper puls CO₂ lazerinde delinmiş bazı delikler ve değişik puls zamanları tarafından delik konikliğinin nasıl kontrol edildiği gösterilmiştir (Melone 1970). Genelde daha kısa puls zamanlarında delik daha konik olabilir.

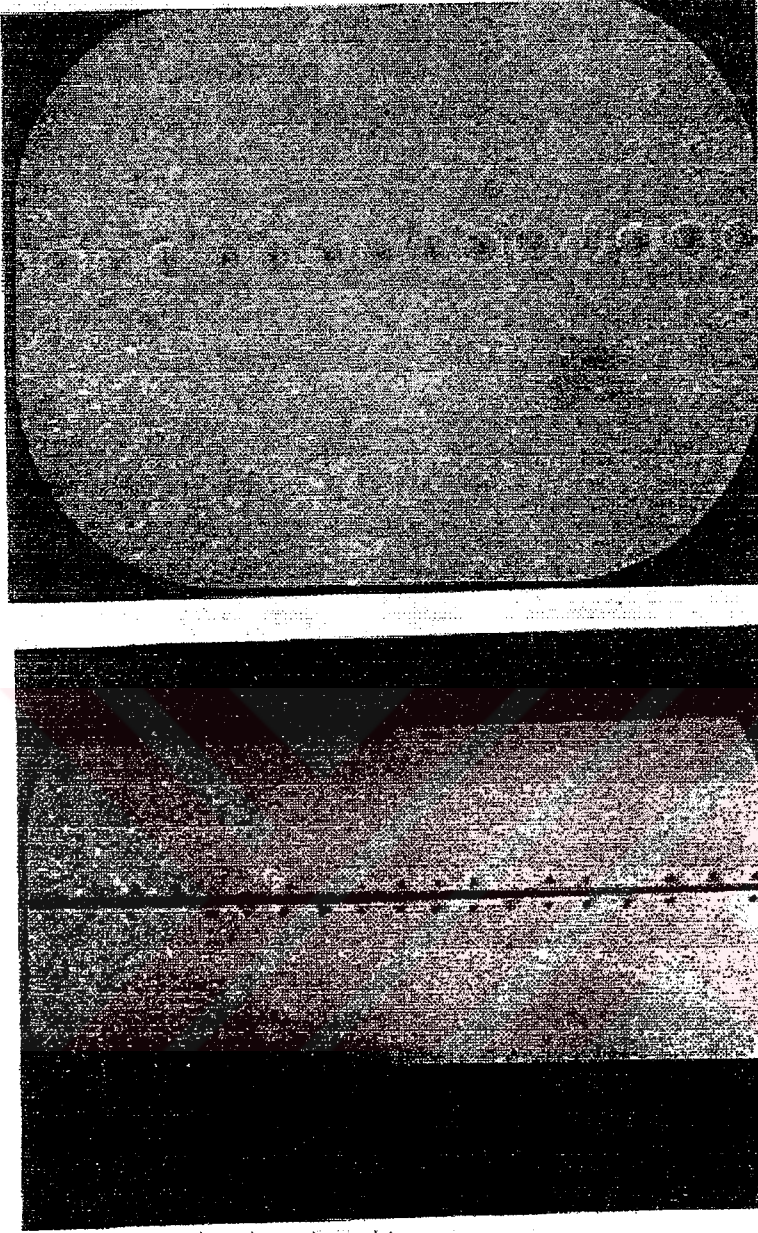
Genellikle yakut, cw-CO₂ yada süperpuls CO₂ lazeri ile seramik üzerinde delinmiş deliklerin giriş deliğinin çevresinde katılaşmış metalin oluşturduğu kenara sahiptirler. Bu kenar kolayca yok edilebilir ve kazınabilir. Alternatif olarak lazer kartın altına odaklanabilir. Yeterince konik delikler açılır, fakat bunda yüzey çöküntüsü yoktur (Melone 1970). Seramiğe delik delerken başka bir potansiyel zorluk mevcuttur. Deliğin duvar yüzeyindeki malzeme yapısı ana malzemeninkinden oldukça farklıdır. Şekil 2.16’de önemli mikro çatlaklar örnek olarak gösterilmiştir. Isıdan etkilenmiş katmanın kalınlığı 10 – 25 µm dir ve bu durum 3 lazer ile delinmiş deliklerde bulunur. Şimdilerde kırılmanın şiddeti çok katlı bağlantılara lazer ile delik delmenin uygulanabilirliği üzerinde etkilidir. Lazer parametrelerinin katman kalınlığına ve mikro çatlakların tekrarlanmasına olan etkisi bilinmemektedir.

Lazerler özellikle CO₂, yumuşak ve plastik malzemeleri delmede, sert ve kırılğan malzemelerde olduğu kadar iyi uygulanmaktadır. Kalın mylar bloklarında ince delikler delinmiştir ve hassas kontrol oranlarında atmosfer ile içeriğin tepkime vermesine müsaade etmek için karbondioksit lazerle plastik film paketi delinmiştir (Laser Focus 1968 a). Değişik plastikler süper puls lazeri ile delinmiştir. 65W lazer ile 0,25’de 1 ¼”İnç kalınlığa kadar delinebilir (Lazer focus 1986). Lastik biberon emziklerinde üretim hattında delik delmek için süper puls CO₂ lazeri kullanılmıştır (Laser Focus 1969). Tek lazer pulsu 3 parçaya ayrılır ve optik sistem tarafından iki hava alma deliği ve birde beslenme deliği delmek için odaklanır. Temassız buharlaştırma yöntemi ile delmeden itibaren tortular elimine edilmiş, sıcak tel ya da mekanik zımbalama uygulamalarından daha sıhhi hale gelmiştir.

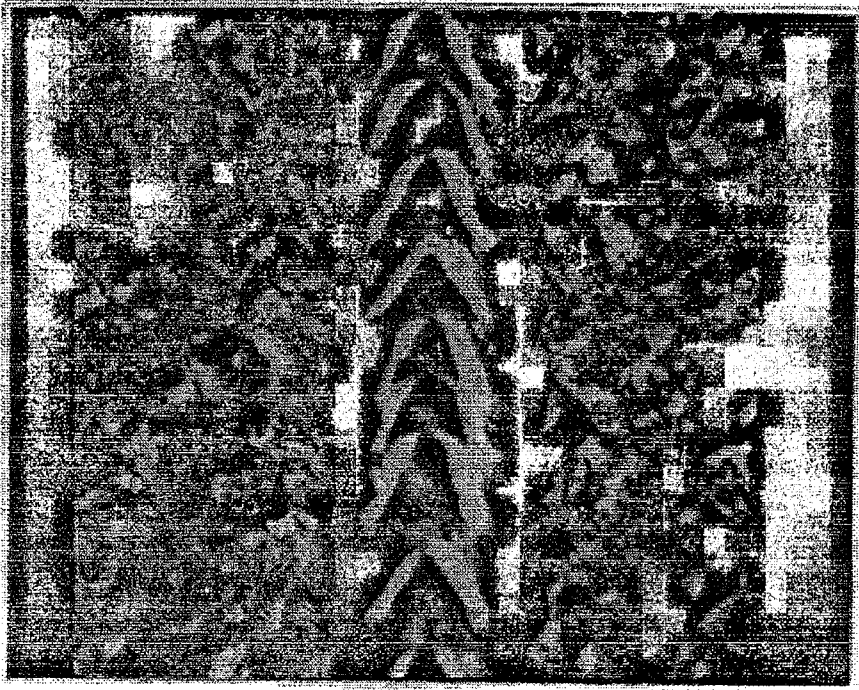
Seramik ve diğerk kırılğan malzemeleri küçük elektronik devrelere ayırmak için birkaç lazer yöntemi geliştirilmiştir. Kullanışlı bir teknikte CO₂ lazeri kullanarak 100-150 µm çaplı malzeme kalınlığının 1/3'ü derinliğinde kör delikler açarak malzemeyi posta pulu benzeri



Şekil 2.16 Süperpuls CO₂ lazeri ile delinmiş 0.7 mm kalınlığındaki Alümina seramik parçaların elektron mikroskobu ile çekilmiş resimleri. A) Lazer parametreleri doğrusal delik üretmek için seçilmiş. B) Delik ağzı yanmış (Melone 1970).

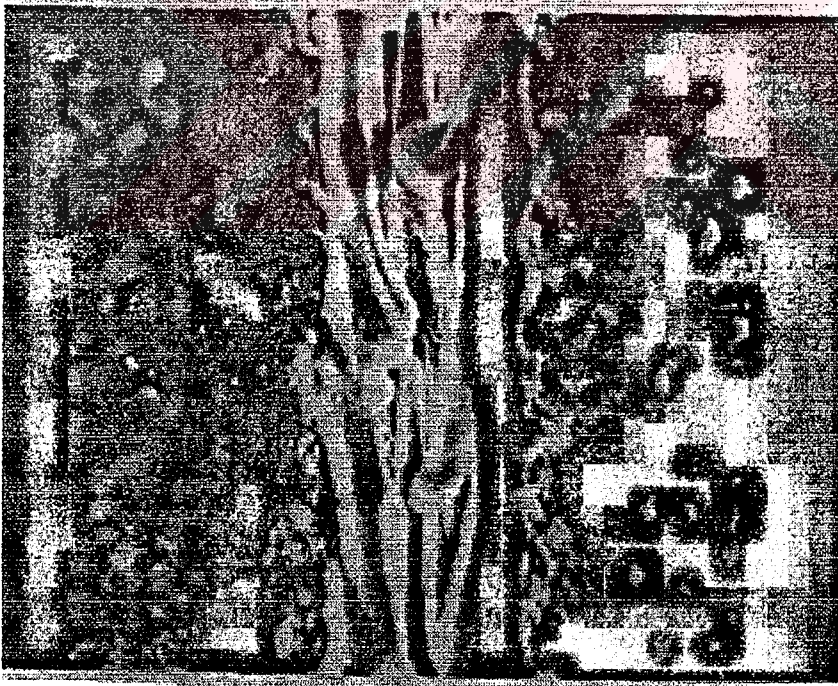


Şekil 2.17 : 3300 pps pulsla, CO₂ lazeri ile delinmiş 0.7 mm kalınlığındaki Alümina seramik parçanın delikler boyunca kırılmadan önceki ve sonraki durumu (Webster ve Horton 1970).



25 μm

500 PPS

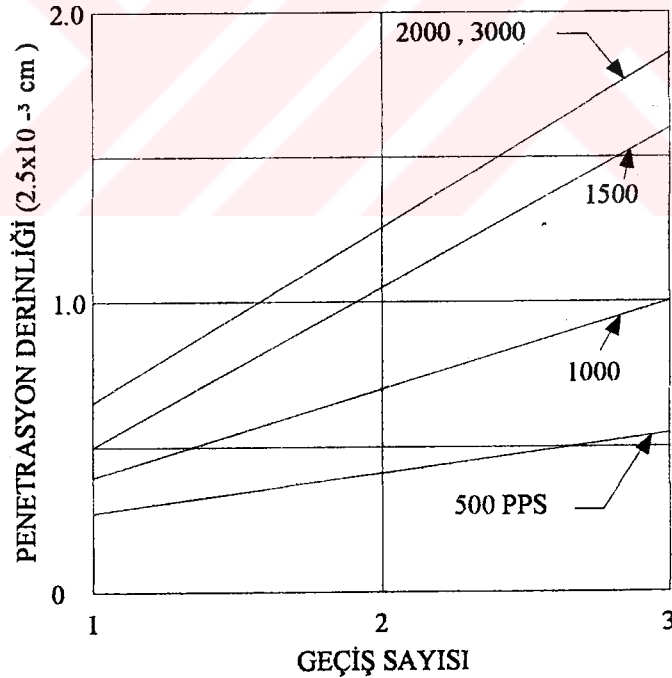


2000 PPS

Şekil 2.18 : Q-switched YAG lazeri ile çizilmiş alümina seramik parçanın elektron mikroskobu ile çekilmiş resmi (Webster ve Horton 1970).

şekilde çizmektir (Longfellow and Oberholzer 1969). Malzeme işaretli çizgiden ayrılır. 0,6 mm-alümina, 1,2 mm cam ve 0,25 mm safir sırasıyla 20, 3,5, 3,5 W ortalama lazer güçleriyle sırasıyla 4,5, 0,9, 0,9 m/dak hızlarında çizilebilir (Webster and Horton 1970). CO₂ 350 Hz oranlarında açılır kapanır. Bu uygulamalar çizginin belirlenmesini düzeltmek için, yüksek puls tekrar oranları ve çizme hızı üzerinde çalışılmıştır. Şekil 17'de 0,7 mm kalınlığında seramik kartın kopmadan önceki ve sonraki, lazerin karakteristiklerinin bazıları gösterilmiştir. Kart 3300 Hz puls tekrar oranlarında ve 45 m/dak hızında çizilmiştir. Herbir delik 38 µm çapında olup, kalınlığın %10' u derinliğindedirler.

Posta pulu biçiminde delmenin sonucunda kırılan kenar tarak biçiminde olur (± 50 µm) ve bazı uygulamalar için yeterli derecede uniform olmayabilir. Eğer tekrarlı Q-switched YAG lazeri kullanılırsa seramiğin çizilmesinde oldukça büyük uniformluk elde edilir. Kısa süreli Q-switched puls süreleri ve daha kısa dalgaboylu YAG lazerinin sonucu olarak yüksek uniformluk (± 5 µm yada daha iyi) elde edilir. Seramik boyunca yüzeysel fakat keskin yiv uniform olarak çizilmiştir ve

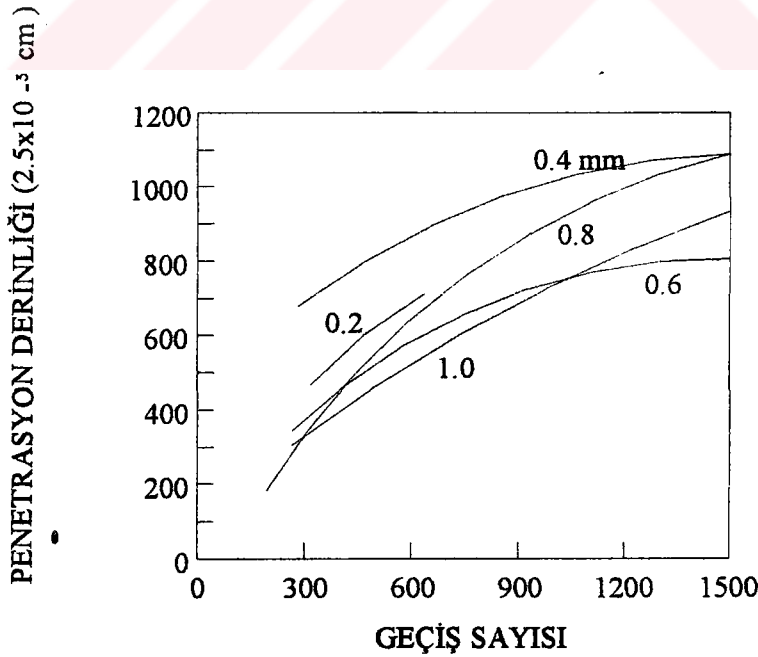


Şekil 2.19 : Alümina seramikte YAG lazerinin tekrar oranı ve çizme geçiş sayısının çizik derinliğine etkisi (Cohen 1969).

seramik yiv boyunca kopar. Çizme hızı üst üste binen pulsların sayısının 2-3 'ü aşmayacak şekilde ayarlanmıştır. Ergimiş seramiğin akmasından sonra yüksek üst üste binmelerde

çizilmiş yivin uniformluğu düşer. Bu hadise Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Kısa dalgaboylu YAG lazerinin yüksek çözünürlüğü ve kısa süreli Q-switched pulslarının sonucunda daha büyük uniformluk ($\pm 5 \mu\text{m}$ yada daha iyi) elde edilir. Yiv dibinde kırılma olmadan düzenli akışla pulslar hafifçe üst üste binerek sn'de 500 pulsta $20 \mu\text{m}$ kalınlığında uniform yiv üretilir. Sn'de 2000 puls da büyük miktarda belirli yiv kenarını bozar ve dipte bazen kırılmalar görülür. Tekrar oranlarının 4-5 üst üste binme sayılarıyla yiv derinliğinin artışından sonra uniformluğu ve penetrasyonu optimize etmek için düşük tekrar oranlarında çoklu geçişleri kullanmak gerekli olabilir. 3 kHz puls tekrar oranlarına kadar $20\text{-}25 \mu\text{m}$ yiv çizmek için Şekil 2.17 deki gerekli pik gücü değerlerinin elde edilmesinde 1,6 W YAG lazeri kullanılır. Malzemenin güvenli bir biçimde kırılması için gerekli $25 \mu\text{m}$ penetrasyon s'de 4 cm hızda, 3 geçişte elde edilir. Daha yüksek lazer güçleri yüksek oranlarda çizmeye izin verir fakat en iyi yiv işlenmesi istendiğinde çoklu geçişler kullanılır.

Benzer çizme teknikleri silikon kartların entegre devre çiplerine ayrılmasında kullanılmıştır (Cohen 1969). $150\text{-}250 \mu\text{m}$ kalınlığındaki kart $50 \mu\text{m}$ derinliğinde $22 \mu\text{m}$ genişliğinde çizilir ve değişik mekanik metotlarla küçük çiplere ayrılır. Ortalama 1,2 W güçteki Q-switched YAG lazeri ile 4 kHz 'te s'de 5 cm çizme hızı elde edilir (Kaplan 1970).



Şekil 2.20 : Gaz jeti ile takviye edilmiş 150 W CO₂ lazeri ile kesmede Oksijen debisinin kesme hızına olan etkisi (Arata et al. 1969).

Her ne kadar CO₂ lazer bazı uygulamalarda birçok malzemeyi kesmek için kullanıldıysa da, yüksek hızlı inert yada reaktif gaz jeti ile kombine edilerek gücü arttırılmış kesme takımı gibi kullanılır. Reaktif gaz yöntemlerinde genellikle oksijen kullanılır. Lazer hedef noktayı reaksiyon sıcaklığına getirmekte kullanılır. Yanma ve erozyon oluşur ve bazı durumlarda oksijen ile malzeme arasındaki ekzotermik reaksiyon yardımı ile kesim yapılır (Bod et al. 1969, Sullivan ve Houldcroft 1967). Arata et al. (1969) karbonlu çeliklerde lazer ve gaz parametrelerinin kesme hızı ve kalitesine etkileri üzerinde geniş çalışmalarda bulunmuştur. Bunlar gösterir ki verilen bir lazer gücü (150 W) için kesme hızı oksijen akış oranının artmasıyla fark edilir derecede yükselmiş ve değişik kalınlıklardaki çeliklerin kesilmesi için gerekli lazer gücü verilerini sunmuştur. Eğer verilen kalınlık için lazer gücü çok büyük olursa ergimiş cüruf kesme kenarını bozacak, genişletecek tortular bırakır.

İnert gaz ile kesme cam seramik, kumaş, kağıt ve ağaç gibi kırılğan yada parlayıcı malzemelerde kullanışlıdır (Adams 1968). Gaz jeti erimiş kesim bölgesinden kesim bölgesinden uzaklaştırır, kırılma yada yanmayı önlemek için kesilen malzemenin kenarını soğutur ve daha uniform kesim elde edilir. Kontrplak kesim uygulamasında, yüksek hızlı hava jeti ağacın buharlaşmasını kontrol etmekte, yanmayı önlemekte kullanılır ve 2 cm kalınlığındaki kontrplağın 30 cm/dak hızlarında 250 W lazer ile kesilmesine izin verir (Industrial Research 1970, Coherent Radition Laboratory). Tipik kesme geometrisi 0,65 mm kesme boşluğu 2 cm kalınlıkta, 2 inch kalınlığa kadar ahşap malzemede kesim yapılmıştır. İnert ve reaktif gazla kesimde, gaz nozulu lensle eşmerkezli, nozul çıkışı odak yüzeyine mümkün mertebe yakın (0,8 mm) konumlandırılır. Nozul dizaynı ve gaz parametreleri belirli uygulamalar için optimize edilmiştir. Arata et al. (1969) çelik üzerindeki çalışmaları için 0,6 mm çaplı nozul ve 300-1500 l/saat oksijen debisi kullanmıştır.

Çizelge 2.4 Gaz jeti ilaveli CO₂ lazeri ile kesim sonuçları (Webster and Horton 1970, Industrial Research 1970).

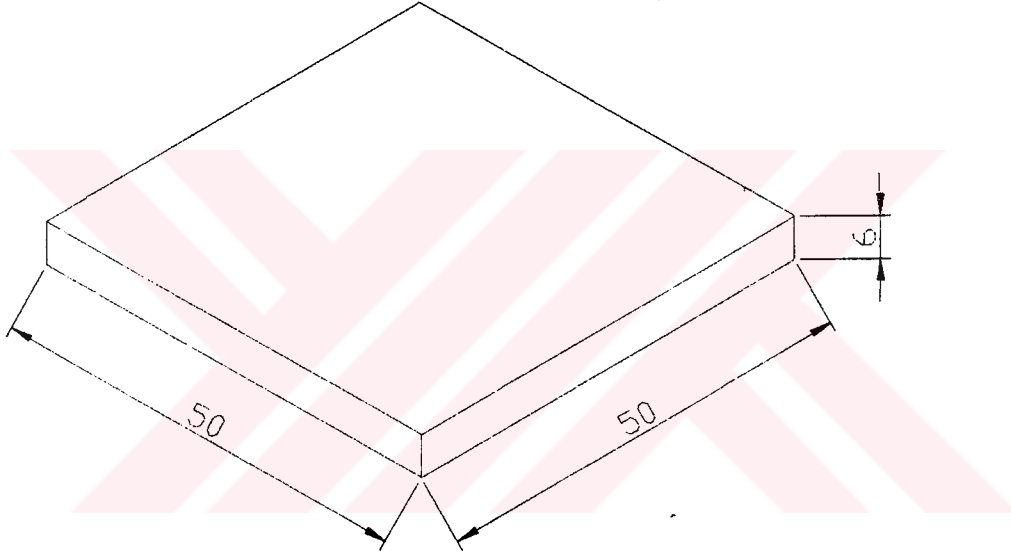
Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (cm/dak)	Max. Kesme boşluğu (mm)	Lazer gücü (W)	Gaz
Ti6A14Va	8,9	254	1,65	260	O ₂
	6,3	260	1	250	O ₂
	2,2	381	0,76	210	O ₂
	1,3	762	0,76	210	O ₂
	3,8	508	0,76	230	O ₂
Çelik C1010	3,8	56	1	190	O ₂
Paslanmaz çelik 321	1,3	76	0,51	165	O ₂
Zirkonyum alaşımı	0,46	1524	0,51	230	O ₂
Cam (SLS)	4,2	10	-	200	Hava
	1,6	38	-	200	Hava
	0,22	508	-	200	Hava
Takviye edilmiş Plastik	2,4	64	-	200	Hava
Alümina %99,5	0,66	127	0,28	175	N ₂
	1,4	76	0,56	240	N ₂
Laminant kaplı kontraplak	15,7	24	1	240	Hava
Çam kerestesi	51	10	-	200	Hava
Meşe kerestesi	18,3	198	-	200	Hava
Mukavva	0,56	1370	0,2	50	N ₂
	89	762	0,15	50	N ₂
	2,2	216	0,61	250	N ₂
Polyester halı	6,3	305	0,51	200	Argon
	7	305	0,51	200	Argon
ABS Plastik	2,5	380	0,76	240	N ₂
PVC Plastik	0,13	762	0,46	200	N ₂
Akrilik	2,3	380	0,76	250	N ₂
	25,4	10	1,52	250	N ₂

Çizelge 2.4' te CO₂ lazer gaz jeti kesmedeki bazı parametreler listelenmiştir. Gelecekte lazer güç seviyesi kesinlikle artacağından bu değerler sınır olarak görülmemelidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Deneysel çalışmalarda DIN EN 10 025 – 94 kalite 6 mm kalınlığında sıcak çekme sac (%0,1 C, % 0,5 Mn, %0,025 P, %0,050 Si, %0,10 Al) kullanılmıştır. Sac malzeme Şekil 3.1 de verilen boyutlarda 1800 W CO₂ lazeri ile kesilmiştir . Lazer modu olarak normal puls seşilmiştir .



Şekil 3.1 Numune olarak kesilen parça (Ölçüler mm cinsinden verilmiştir).

Parçalar lazer alevli kesme metodu kullanılarak kesilmiştir. Sabit kesme Parametreleri aşağıdaki gibidir.

- Nozul yüksekliği : 0,7 mm
- Başlama deliği zamanı : 1,2 s
- Başlama deliği gaz basıncı : 1,5 bar

3.2 Yöntem

Optimum kesme şartlarının tespit edilebilmesi için Çizelge 3.1 de verilen şartlarda kesim yapılmıştır. Kesme işlemi 3 grupta gerçekleşmiş olup her grupta kesme parametreleri olan Lazer Gücü, Kesme Gazı Basıncı, Kesme Hızı değerlerinin ikisi sabit tutulup biri değiştirilerek uygulanmıştır.

Çizelge 3.1 Kesilen numunelere ait kesme parametreleri

A) Lazer Gücü ve Gaz Basıncı sabit, KESME HIZI değişken

PARÇA NO	GÜÇ (%)	GAZ(O ₂) BASINCI (bar)	KESME HIZI (mm/dak)
1.1	60	2,5	1800
1.2	60	2,5	1500
1.3	60	2,5	1200
1.4	60	2,5	900

B) Lazer Gücü ve Kesme Hızı sabit, GAZ BASINCI değişken

PARÇA NO	GÜÇ (%)	GAZ (O ₂) BASINCI (bar)	KESME HIZI (mm/dak)
2.1	60	2	1500
2.2	60	1,5	1500
2.3	60	1	1500
2.4	60	0,5	1500

C) Lazer Gücü ve Kesme Hızı sabit, GAZ BASINCI değişken

PARÇA NO	GÜÇ (%)	GAZ (O ₂) BASINCI (bar)	KESME HIZI (mm/dak)
3.1	45	0,5	1500
3.2	60	0,5	1500
3.3	75	0,5	1500
3.4	90	0,5	1500

Kesme işleminde kullanılan Lazer Kesme tezgahı 1800 W Rezanatöre sahip, 12 mm'ye kadar siyah sac 6 mm'ye kadar paslanmaz çelik kesme kapasitesine sahiptir. Odak mesafesi kapasitif sensörle korunan tezgahın aynaları ve kesme kafası su soğutmalıdır.

Kesme işlemi için gerekli yüksek yoğunluktaki Lazer ışını rezonatörde CO_2 atomlarının, N_2 ve He gazları atmosferi altında rezonansa sokulmaları ile elde edilir. Tam ve yarı geçirgen aynalar arasında gidip gelen ışın daha fazla elektronu uyararak sistemin zincirleme reaksiyona girmesini sağlar. Yaklaşık 30 dakika süreden sonra yeterince elektron yarı geçirgen aynadan geçmeye başlar. Oluşan ışın yaklaşık 40 mm çapında olup beam expansion sistemi ile sonsuza odaklanır. Bu sistem ışının havada yayılımının 10-15 m mesafe içerisinde tam doğrusal olmasını sağlar. Bu aşamadan sonra aynalar yardımı ile yönlendirilen ışın kesme kafasına ulaşır. Burada ışın içbükey aynada sac parça üzerine odaklanır.

Kesilen tüm parçaların iç yapı fotoğrafları çekilmiştir. İç yapı fotoğrafları için x100 büyütme kapasitesine sahip mikroskop kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü incelemesi için ise yüksek çözünürlüğe sahip tarayıcı kullanılmıştır.

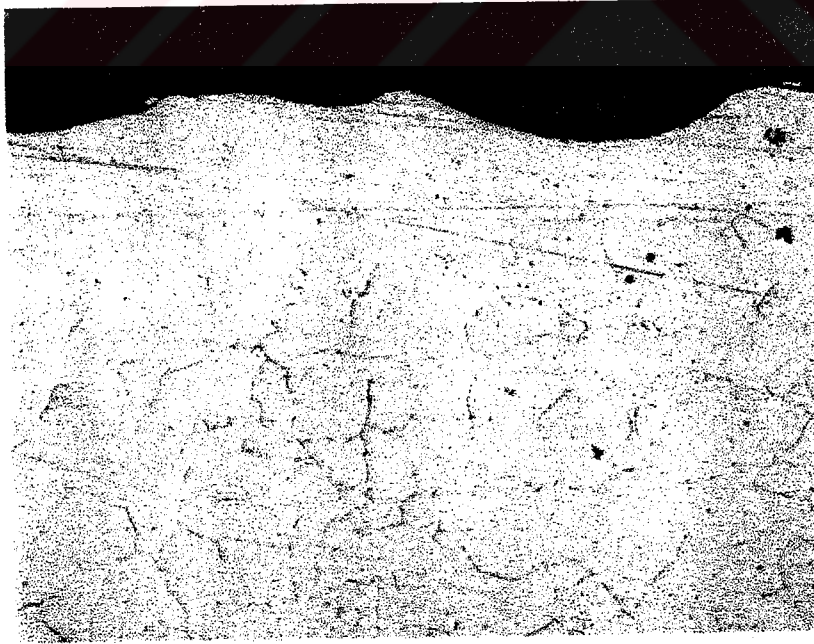


4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

DIN EN 10 025 – 94 kalitesindeki sac metalin optimum kesme parametrelerinin tespit edilebilmesi için Çizelge 3.1 'de verilen şartlarda kesimler yapılmış ve kesme bölgesi iç yapı fotoğrafları çekilmiştir. Ayrıca kesme yüzeyleri tarayıcı tarafından görüntülenmiştir. Kesmeyle elde edilen parçalarda istenen özellik, ısıdan etkilenen bölgenin derinliğinin az ve parçanın kullanıldığı yere göre azami üretim hızında, olabildiğince yüksek kalitede yüzey elde etmektir. Lazerin otomotiv sektörü vb. alanlarda kullanılabilirliğinin maliyet açısından da olduğunu göstermek amacıyla kalıpta imal usulü ile karşılaştırılma yapılmıştır .

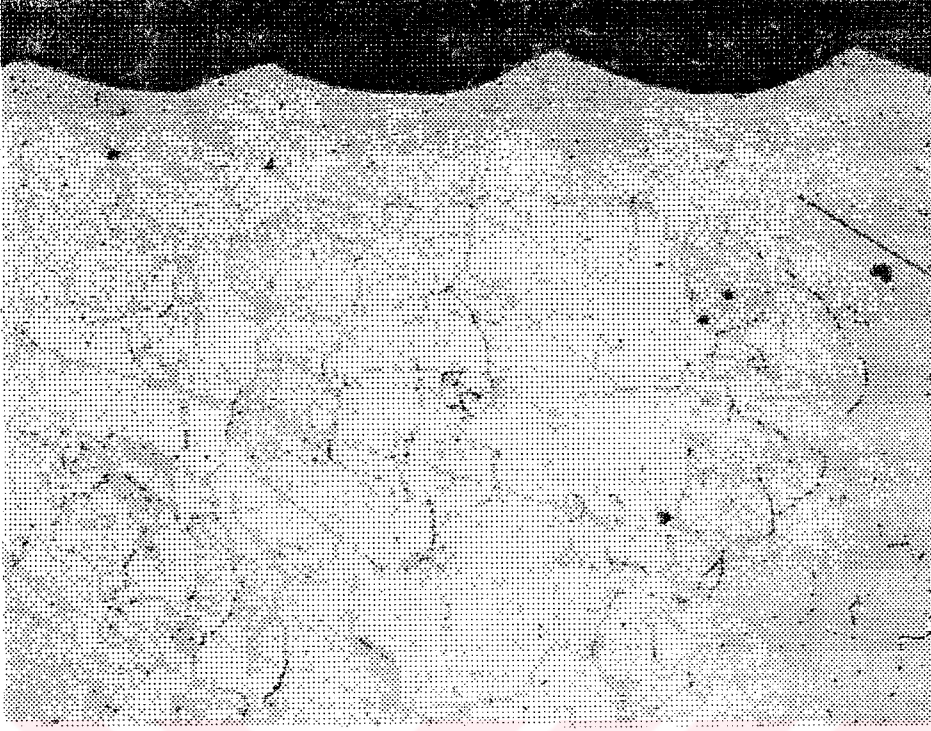
4.1 Kesme Bölgesinin İç Yapı İtibarı İle İncelenmesi

Kesme Bölgesi incelendiğinde Şekil 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 resimlerde görüldüğü gibi parçaların ısıdan etkilenen bölgelerinde mikro yapının ince taneli hale dönüştüğü görülmektedir. Ayrıca bölgelerde ani sıcaklık değişimi olması sebebi ile malzemelerde yüzeyin bir miktar sertleştiği tecrübe ile görülmüştür. Kesme parametreleri esas alındığında kesme bölgesi ısıdan etkilenme derinliği Çizelge 4.1'de verilmiştir.



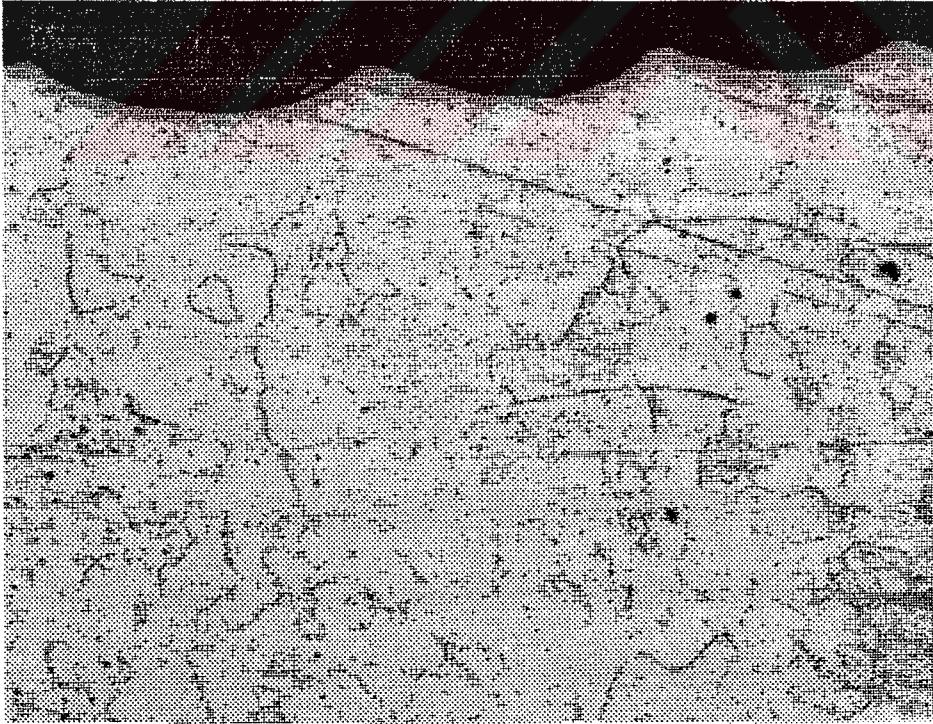
x100

Şekil 4.1 Lazerde kesilmiş parça (1.1 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı: 1800 mm/dak).



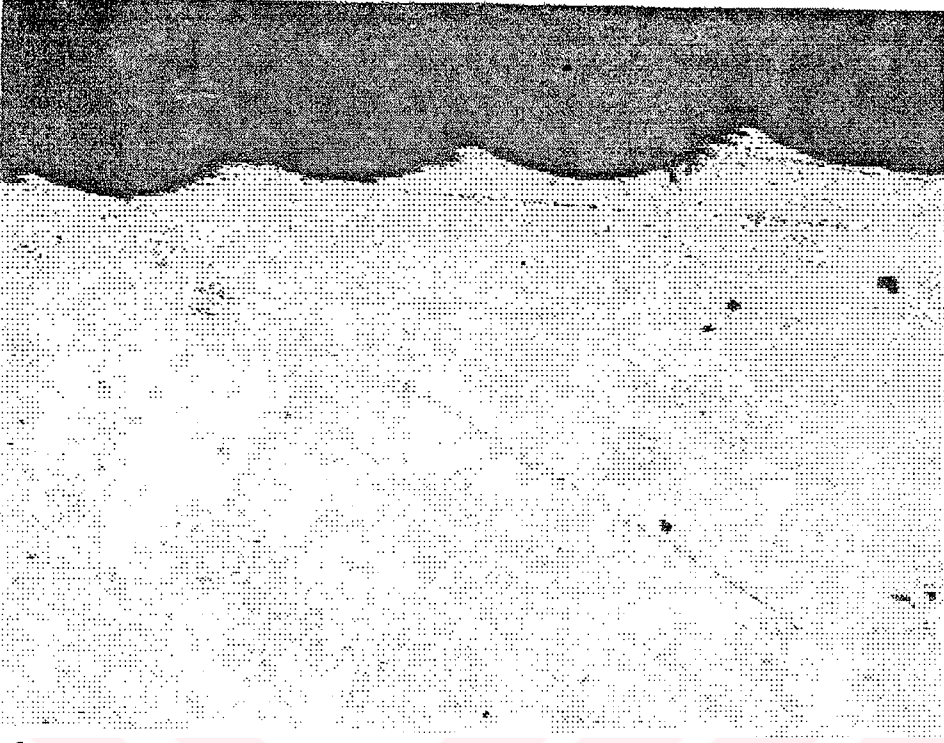
X100

Şekil 4.2 Lazerde kesilmiş parça (1.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



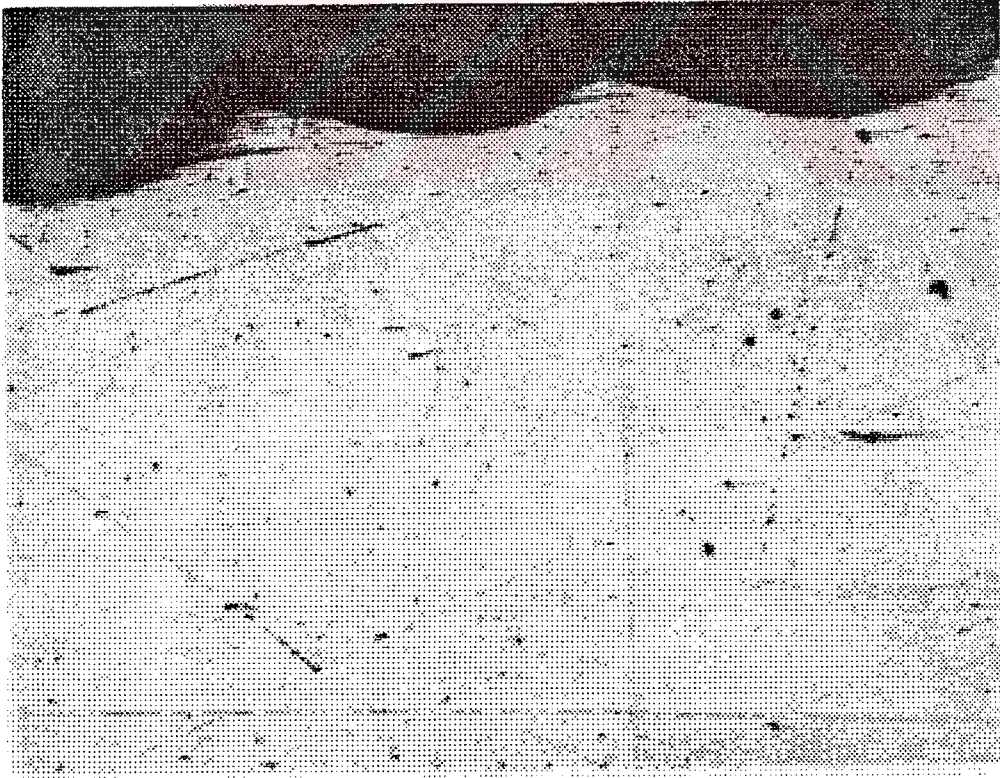
X100

Şekil 4.3 Lazerde kesilmiş parça (1.3 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:1200 mm/dak).



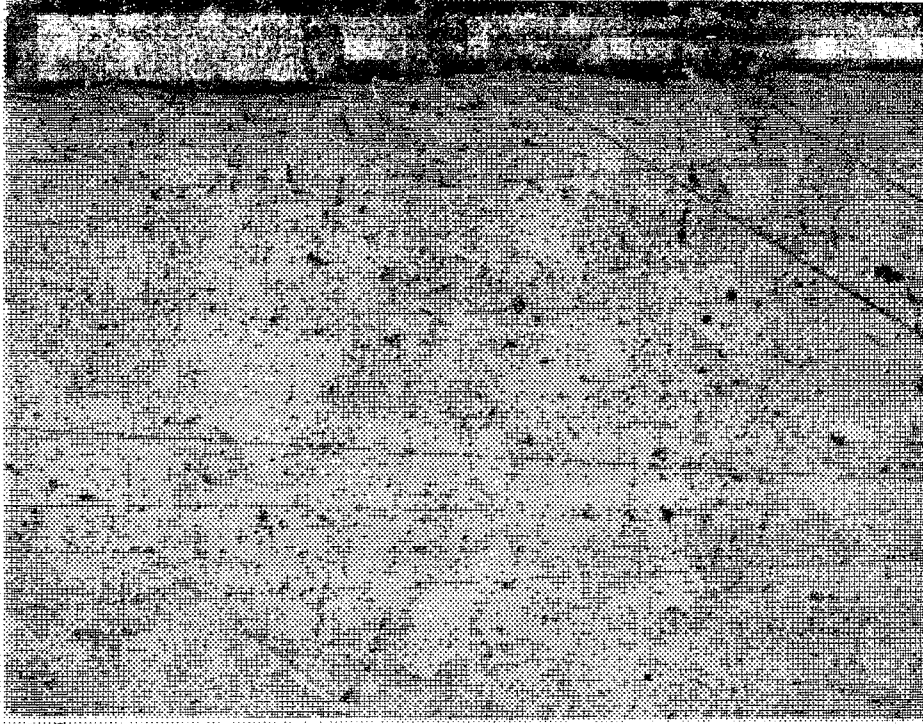
.100

Şekil 4.4 Lazerde kesilmiş parça (1.4 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:900 mm/dak).



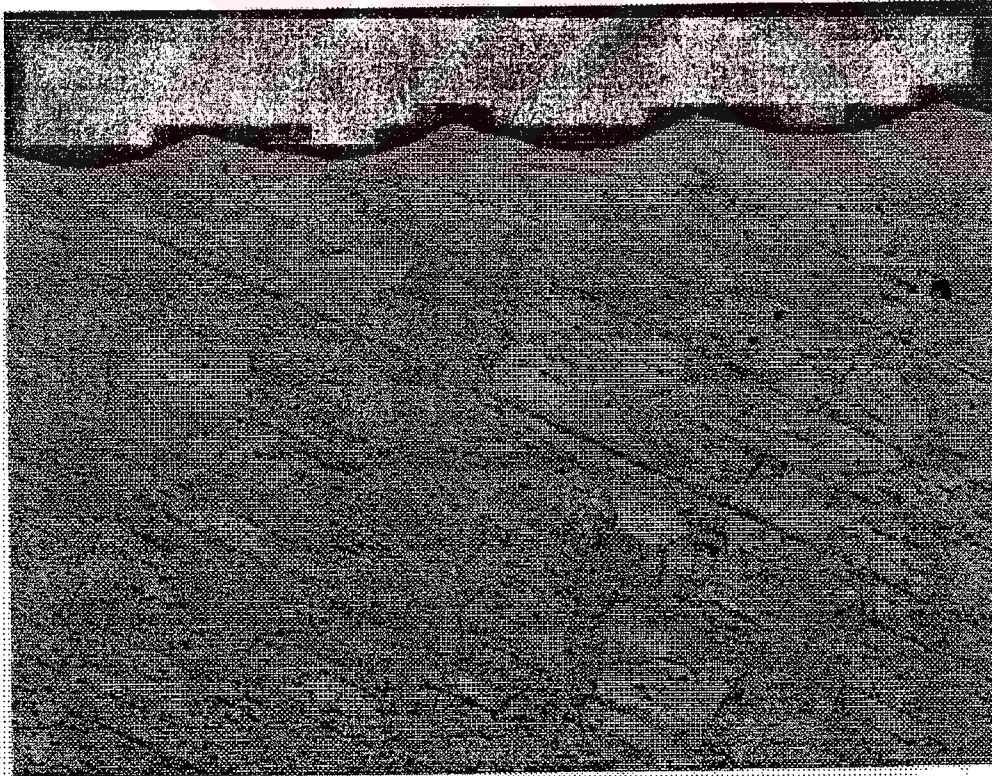
100

Şekil 4.5 Lazerde kesilmiş parça (2.1 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



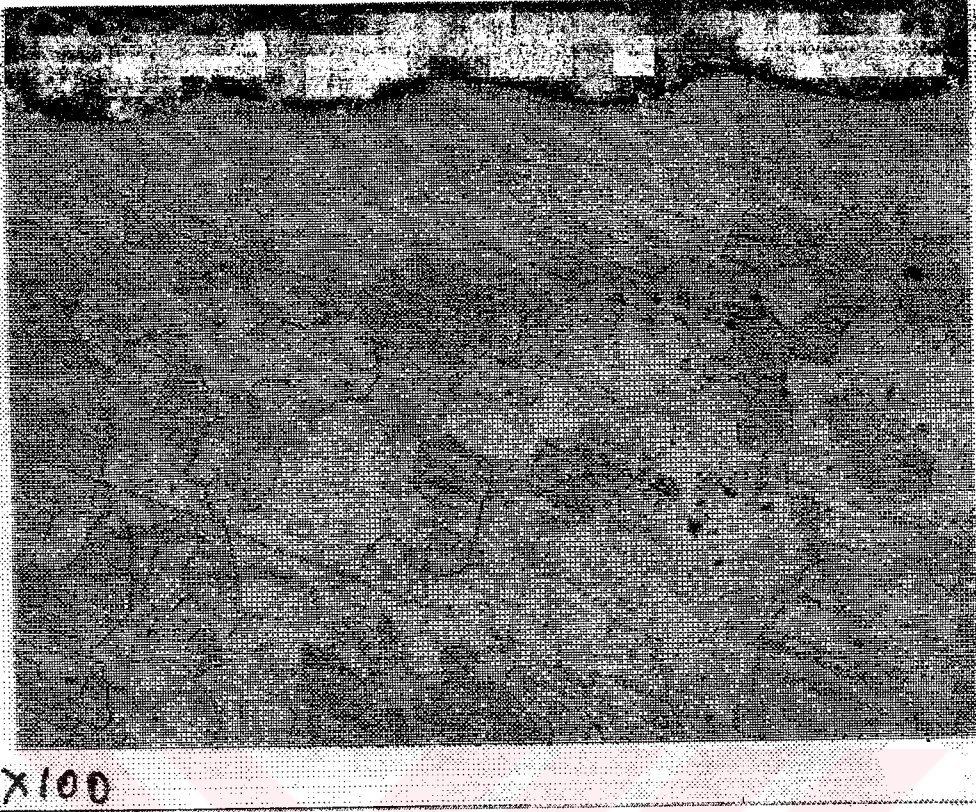
x100

Şekil 4.6 Lazerde kesilmiş parça (2.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:1,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).

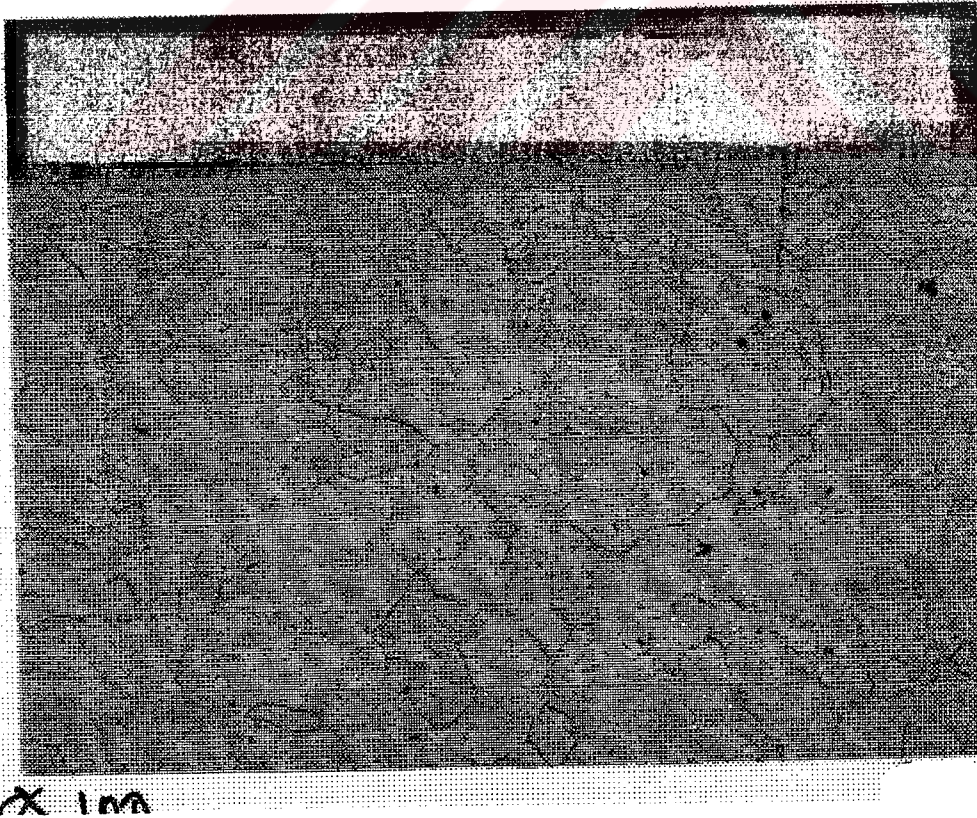


x100

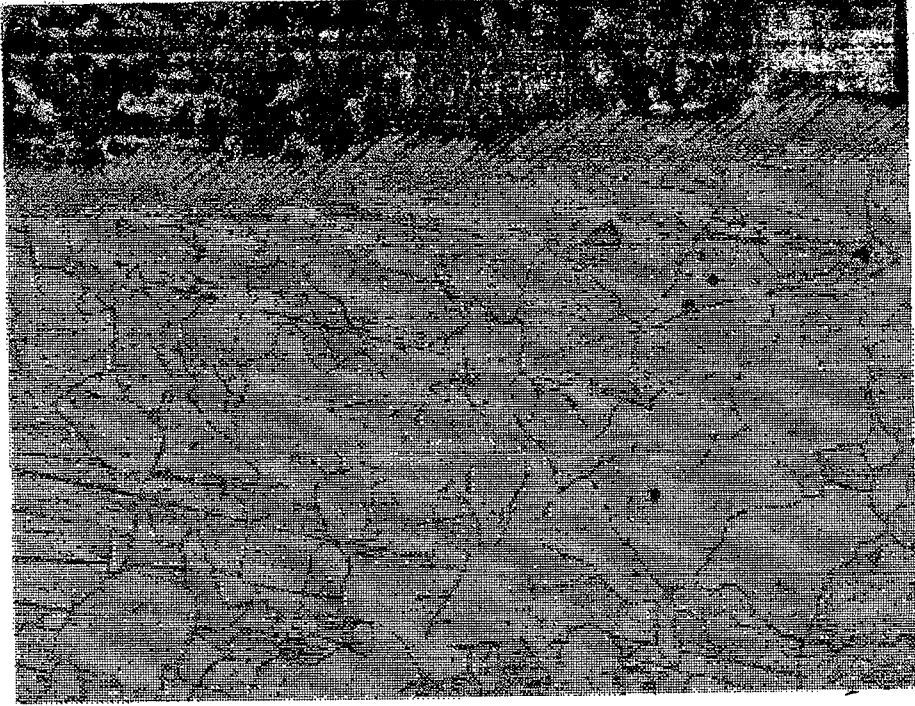
Şekil 4.7 Lazerde kesilmiş parça (2.3 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:1 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



Şekil 4.8 Lazerde kesilmiş parça (2.4 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı: 1500 mm/dak).

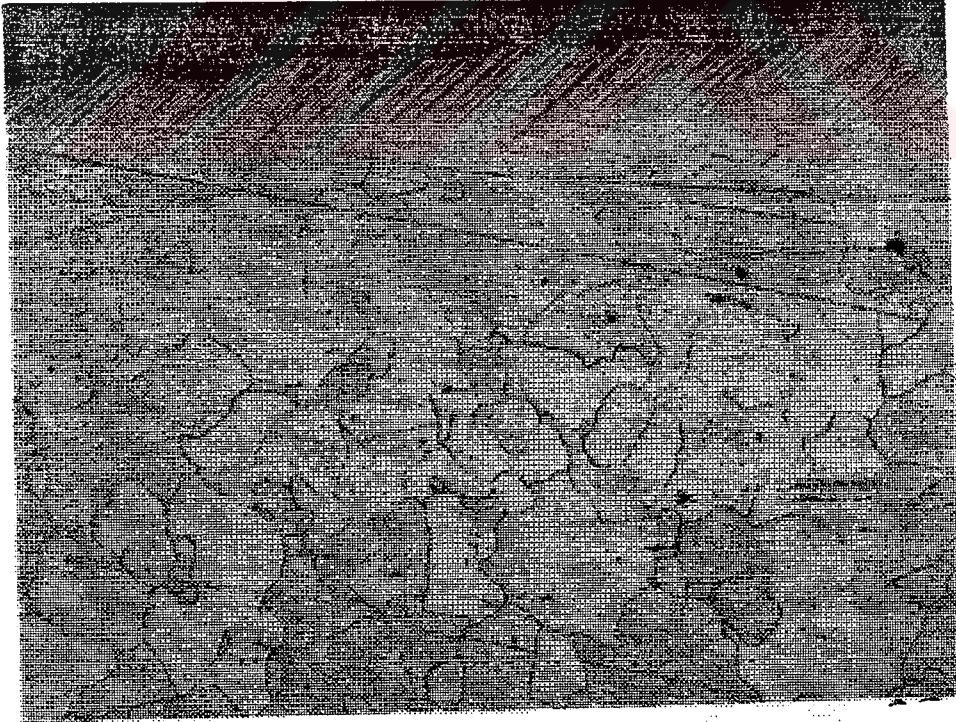


Şekil 4.9 Lazerde kesilmiş parça (3.1 nolu parça Güç: %45, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı: 1500 mm/dak).



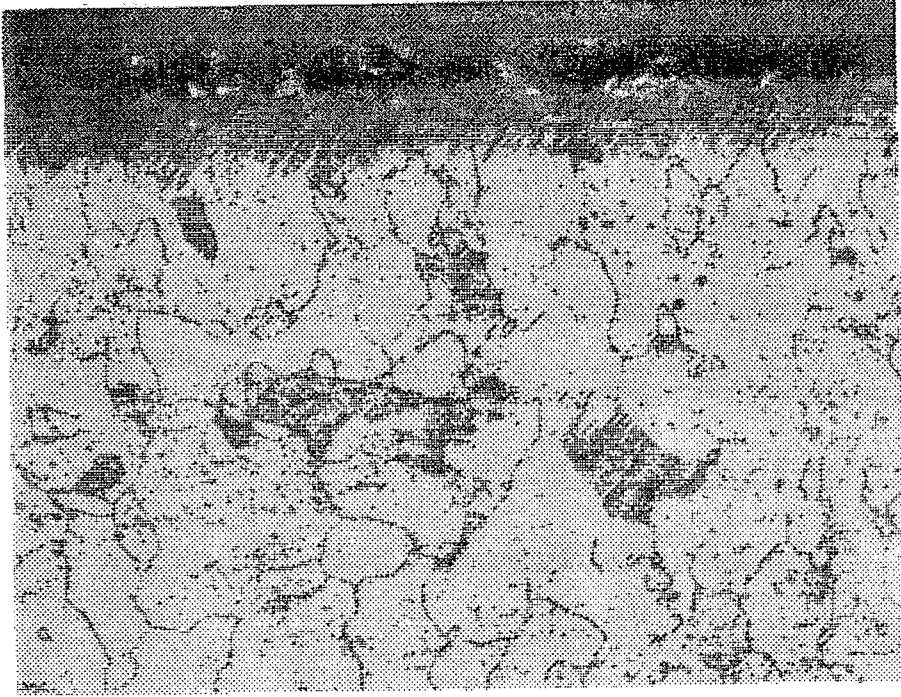
x100

Şekil 4.10 Lazerde kesilmiş parça (3.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



x100

Şekil 4.11 Lazerde kesilmiş parça (3.3 nolu parça Güç: %75, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).

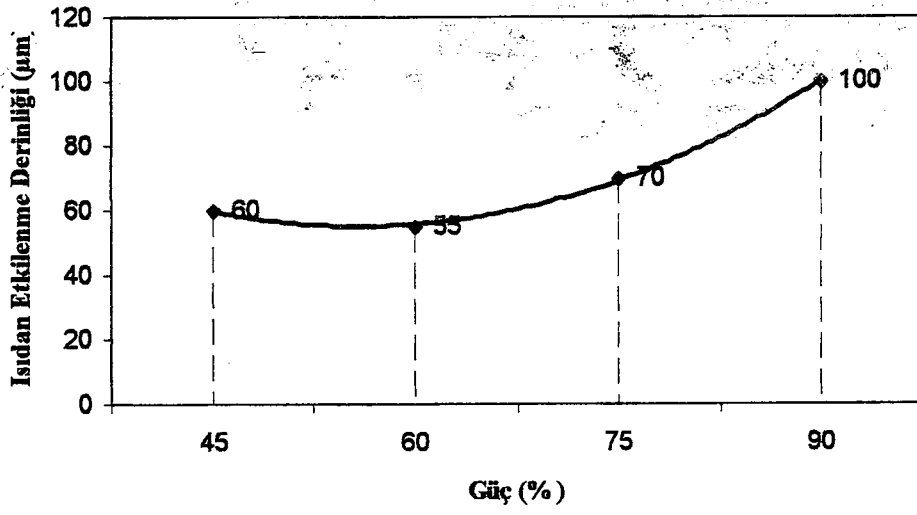


X100

Şekil 4.12 Lazerde kesilmiş parça (3.4 nolu parça Güç: %90, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı: 1500 mm/dak).

Çizelge 4.1 Isıdan etkilenmiş bölgenin derinliği

PARÇA NO	GÜÇ (%)	GAZ(O ₂) BASINCI (bar)	KESME HIZI (mm/dak)	ISIDAN ETKİLENMİŞ BÖLGE DERİNLİĞİ (µm)
1.1	60	2,5	1800	87,5
1.2	60	2,5	1500	90
1.3	60	2,5	1200	120
1.4	60	2,5	900	130
2.1	60	2	1500	70
2.2	60	1,5	1500	60
2.3	60	1	1500	40
2.4	60	0,5	1500	35
3.1	45	0,5	1500	60
3.2	60	0,5	1500	55
3.3	75	0,5	1500	70
3.4	90	0,5	1500	100

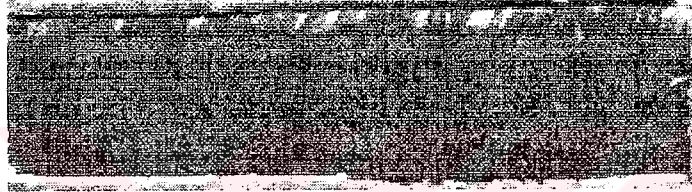


Şekil 4.15 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 nolu parçaların Güç – Isıdan etkilenen bölge derinliği grafiği
(Kesme gazı basıncı 0.5 bar ve kesme hızı 1500 mm/dak sabit).

4.2 Kesme Bölgesindeki Yüzey Kalitesinin İncelenmesi

Çizelge 3.1 de verilen kesme parametreleri kullanılarak kesilen parçaların kesim yüzeyleri yüksek çözünürlükteki tarayıcı ile taratılmış iki tepé yada çukur arasındaki mesafe ölçülerek kesme esnasında oluşan yivlerin sıklığı saptanmıştır. Parametre değişikliklerine göre yüzey incelendiğinde kesme gazı olan O₂ gazının basıncının artışıyla yüzey kalitesinin diğer parametrelere oranla daha yüksek miktarda bozulduğu görülmüştür .

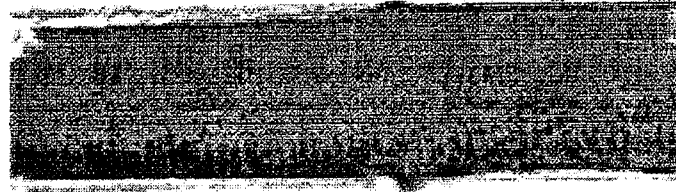
Yüzey fotoğrafları Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 görülmektedir.



Şekil 4.16 Lazerde kesilmiş parça (1.1 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:1800 mm/dak).



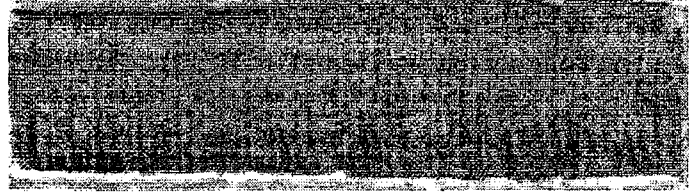
Şekil 4.17 Lazerde kesilmiş parça (1.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar , Kesme Hızı:1500 mm/dak).



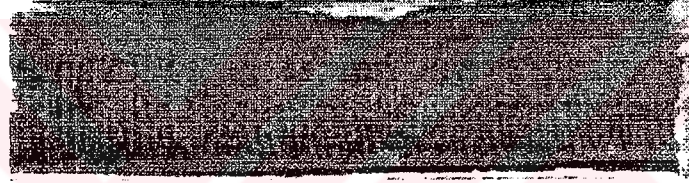
Şekil 4.18 Lazerde kesilmiş parça (1.3 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:1200 mm/dak).



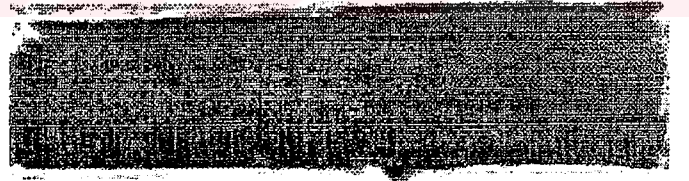
Şekil 4.19 Lazerde kesilmiş parça (1.4 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2,5 bar, Kesme Hızı:900 mm/dak).



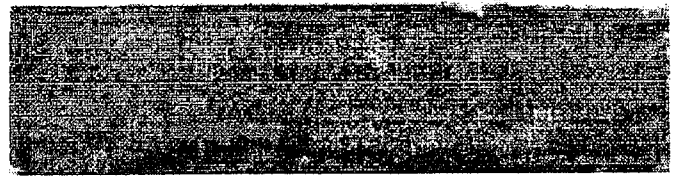
Şekil 4.20 Lazerde kesilmiş parça (2.1 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:2 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



Şekil 4.21 Lazerde kesilmiş parça (2.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:1,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



Şekil 4.22 Lazerde kesilmiş parça (2.3 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:1 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



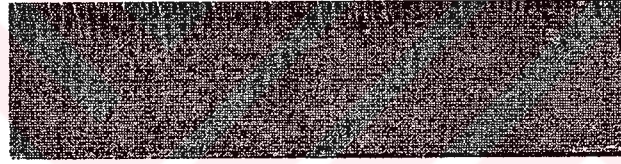
Şekil 4.23 Lazerde kesilmiş parça (2.4 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



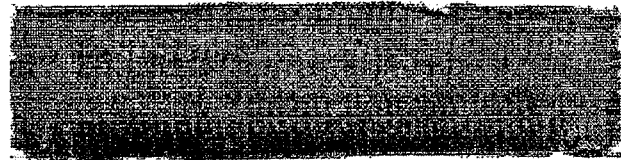
Şekil 4.24 Lazerde kesilmiş parça (3.1 nolu parça Güç: %45, Gaz basıncı:0.5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



Şekil 4.25 Lazerde kesilmiş parça (3.2 nolu parça Güç: %60, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



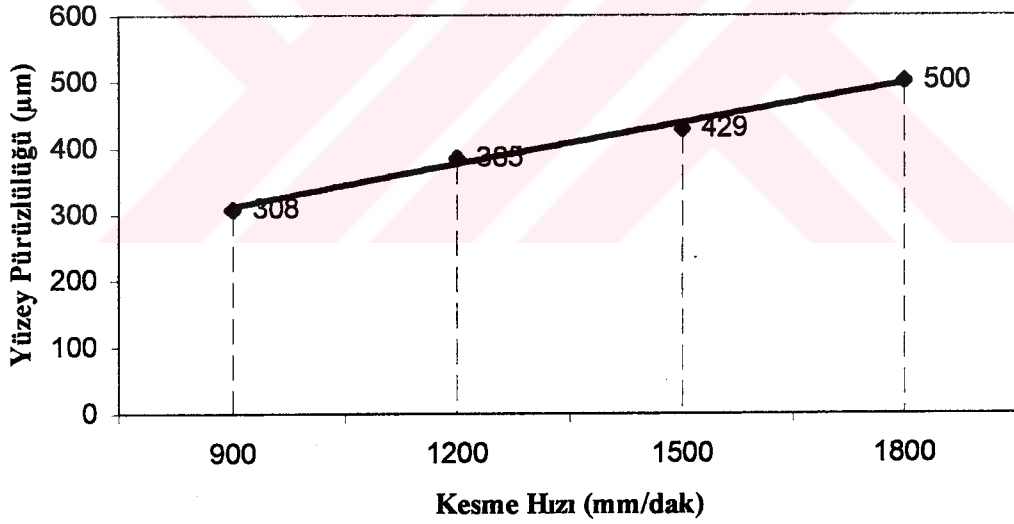
Şekil 4.26 Lazerde kesilmiş parça (3.3 nolu parça Güç: %75, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).



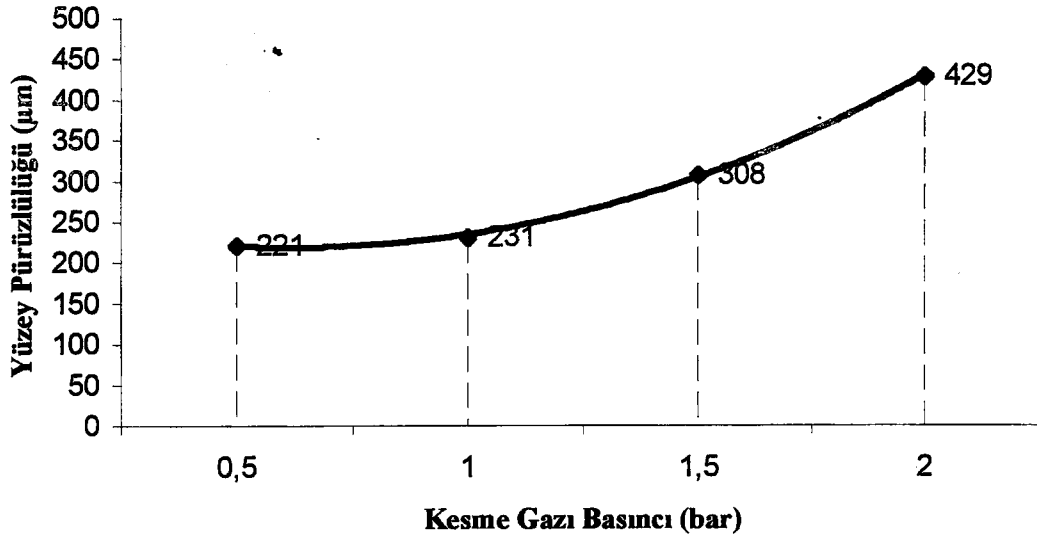
Şekil 4.27 Lazerde kesilmiş parça (3.4 nolu parça Güç: %90, Gaz basıncı:0,5 bar, Kesme Hızı:1500 mm/dak).

Çizelge4.2 Yüzey pürüzlülüğü değeri

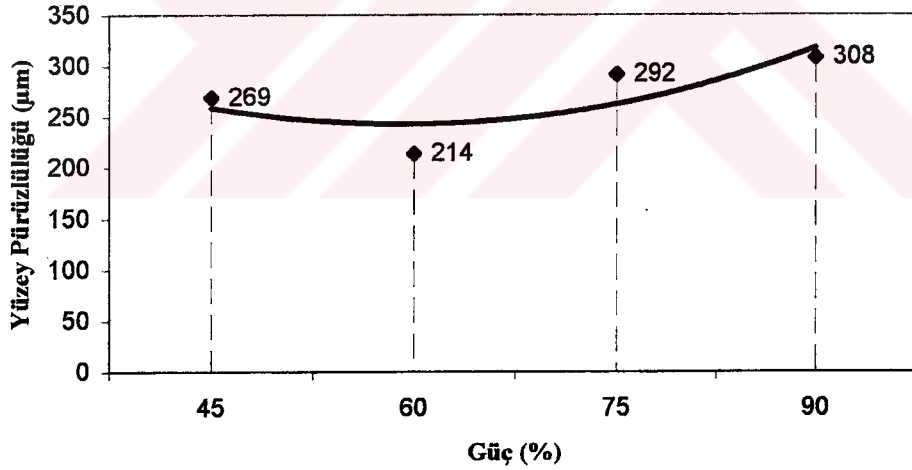
PARÇA NO	GÜÇ (%)	GAZ(O ₂) BASINCI (bar)	KESME HIZI (mm/dak)	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (μ m)
1.1	60	2,5	1800	500
1.2	60	2,5	1500	429
1.3	60	2,5	1200	385
1.4	60	2,5	900	308
2.1	60	2	1500	429
2.2	60	1,5	1500	308
2.3	60	1	1500	231
2.4	60	0,5	1500	269
3.1	45	0,5	1500	214
3.2	60	0,5	1500	269
3.3	75	0,5	1500	292
3.4	90	0,5	1500	308



Şekil 4.28 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 nolu parçaların Kesme Hızı – Yüzey Pürüzlülüğü grafiği (Güç %60 ve kesme gazı basıncı 2.5 bar sabit).



Şekil 4.29 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 nolu parçaların Kesme Gazı Basıncı – Yüzey Pürüzlülüğü grafiği (Güç %60 ve kesme hızı 1500 mm/dak sabit).



Şekil 4.30 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 nolu parçaların Güç – Yüzey Pürüzlülüğü grafiği (Kesme gazı basıncı 2.5 bar ve kesme hızı 1500 mm/dak sabit).

4.3 Lazer kesme ve preste kalıp ile parça imalatının maliyet itibarı ile incelenmesi

Maliyet karşılaştırılması yapılırken kalıp ile kesmede elde edilebilecek yüzey kalitesi de düşünülerek, lazer kesmede en iyi sonucun elde edildiği 3.2-nolu (Güç : % 60, Gaz basıncı 0.5 bar, kesme hızı 1500 mm/dak) parça esas alınmıştır. Hesapta kolaylık olması açısından (değişmeyeceği düşünülerek) hammaddesi ile ilgili bilgiler verilmemiştir. Mukayeseye esas olan düşüce bir parçanın, hangi üretim teknolojisi ile üretildiğinde birim parçanın maliyetinin azaltacağını bulmaktır. Günümüzde modellerin çok fazla sayıda üretilmeden değiştiği ve müşteriye doğru malı teslim etmek kadar kısa zamanda teslim etme gereği düşünüldüğünde lazerin kalıba ihtiyaç duyulmadan, kısa zamanda ve küçük partiler halinde üretilmesi gereken parçalar için önemli avantaja sahip olduğu görülmektedir.

4.3.1 Tezgahın çalışma maliyetinin hesaplanması

İki makinaryı karşılaştırmadan önce, söz konusu makinalara ait çalışma maliyetlerini çıkartacağız. Bu maliyetleri çıkartırken numune olarak kullandığımız parçanın üretim zamanını dikkate alacağız.

4.3.1.1 Gerekli tanımlar

Amortisman	: Makinanın alım fiyatı (USD)/Kullanım yılı
Bakım Masrafları	: Ön görülen bakım masrafı (USD) / yıl
Enerji Masrafları	: Maksimum güç çekimi (kW)x Enerji (USD/kWh) x Yıllık makina çalışma saati (h)
Kullanılan alan masrafları	: Alan masrafı (USD/(m ² xyıl) x Makinanın kapladığı alan
Kalıp Maliyeti	: Kalıp maliyeti (USD)
Kesme gazı maliyeti saati	: O ₂ gazı debisi (l/h) x Gaz ücreti (USD/l) x Yıllık çalışma (h)

4.3.1.2 Kabuller ve Hesaplamalar

Çizelge 4.3 Karşılaştırma tablosu

	Lazer	Pres
Makine Fiyatı (USD)	500.000	20.000
Kullanım Süresi (Yıl)	5	15
Bakım Masrafı (USD)	3300	400
Max Güç (kW)	20	4
Enerji Ücreti (USD/(kWh))	0,5	0,5
Çalışma saati (h)	2400	2400
Alan Masrafı ((USD/(yılxm ²))	50	50
Alan (m ²)	100	4
Kalıp Fiyatı (USD)	-	750
O ₂ Tüketimi (l/h)	2	-
O ₂ Fiyatı (USD/l)	0,003	-
Makine kapasitesi	1500 mm/dak	100 Vuruş/dak
Üretim hızı (h/adet)	0,00222	0,00016
Amortisman USD/yıl	100.000	1.333
Bakım Masrafı USD/yıl	3300	400
Enerji Masrafı USD/yıl	18000	3600
Kullanılan alan masrafı USD/yıl	5000	200
Parça başına kalıp fiyatı USD/adet		750
O ₂ Tüketimi USD/yıl	864	
	+	
	127164	5533
Makine çalışma maliyeti USD/h	52,985	2,305556

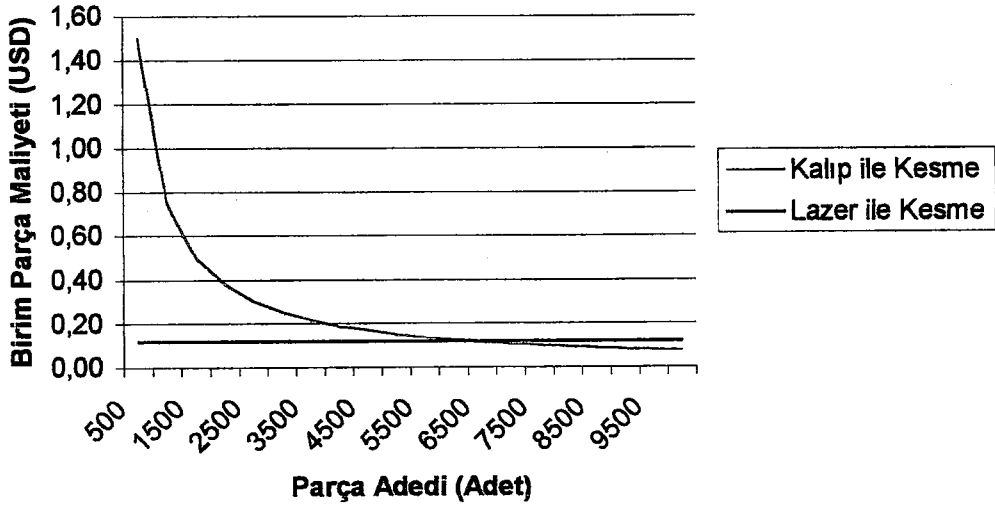
Lazer tezgahında parçanın birim maliyeti Çizelge 4.3 teki veriler esas alındığında adete bağlı aşağıdaki fonksiyonlar elde edilir.

Parça birim maliyeti (USD/adet) = Parçanın üretim süresi (h/adet) x Çalışma maliyeti (USD/h)

Pres için parçanın birim maliyeti= Parçanın üretim süresi (h/Adet) x Çalışma maliyeti (USD/h)+Kalıp maliyeti(USD/adet)

Parça adedinin fonksiyonu olarak parça birim maliyet grafiklerini Şekil 4.31 deki gibi olur . Bu grafiğe göre Lazer kesme ile kalıp ile kesme arasındaki başabaş noktası 6500 adet parçadır. Bu adetten fazlası için lazer kesim maliyeti, prese göre daha fazladır. Lazer ile

kesmede birim parça maliyeti değişmeyecek anca kalıp ile kesmede kalıp maliyetinin parça sayısı arttıkça birim parça maliyetine etkisi azalacaktır



Şekil 4.31 Maliyet analizi

4.4 Tartışma

Lazer ışını ile kesme; CO₂ gazı atomlarına ait elektronların uyarılması ile oluşan ışının aynalar yardımı ile parçaya yönlendirilmesi ve bir mercekle tarafından parça üzerine odaklanması sonrasında ortaya çıkan yüksek miktardaki ısı yardımı ile yapılmaktadır. Maliyetlerin ön plana çıktığı günümüzde, herhangi başka kalıp yada aparata ihtiyaç duymadan parça imal edebilmek önemli bir avantajdır. Bu avantaj ancak imal edilen parçanın istenen fiziksel ve yapısal özelliklere sahip olması ile anlamlı hale gelir. Yüksek derecede yüzey kalitesi istenmediği durumlarda lazer direkt olarak kullanılabilir gibi talaşlı imalat öncesi parçaya ön şekil verme için de kullanılabilir. Özellikle otomotiv endüstrisinde yaygın biçimde kullanılan sac malzemelerin istenen ölçü ve yüzey toleranslarına uymak kaydıyla yapılan parça imalatı, ayrıca parçanın sertliği gibi işlenmesinde belirleyici bir özelliğe bağlı kalmadan kesim yapabiliyor olması lazer için geniş kullanım alanları doğurmuştur.

Lazer ışını ile kesilen parçalarda yüzey kalitesi ve kesim bölgesindeki iç yapı özellikleri kesme parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Tecrübe ile görülmüştür ki uygun olmayan parametrelerle işlem yapıldığında parçanın kesilememesine, keskin köşelerin ve ince kısımların yanarak yok olmasına varan ciddi problemler yaşanabilir.

Uygun parametreler seçilmesi şartı ile kesme bölgesi iç yapısı hiç düşünülmeden kesim yapılabilir. Deneylerde görüldüğü üzere kesme parametrelerindeki büyük değişikliklere rağmen iç yapıda sac malzemelerin kullanılması tehdit edecek bozukluklar ve farklar oluşmamıştır.

Yüzey kalitesinin önemli olduğu yerlerde özellikle kesme gazı olarak O₂ kullanıldığı durumlarda parçanın kenarlarının gaz tarafından ekzotermik reaksiyona girmesinin engellenmesi için kesme gaz basıncı dolayısıyla gaz debisinin düşük tutulması gerekmektedir. Eğer buda yeterli gelmiyor ise kesme gazı olarak N₂ kullanılarak , alevli kesme yerine lazer fizyon kesme tercih edilmelidir.

Maliyetlerin ve teslim sürelerinin önemli olduğu imalat sanayiinde parçaların hangi imalat teknolojisi ile üretileceğinin seçimi çok önemlidir. Lazerin düşük parça sayıları ve

kısa teslim süreleri gerektiren (prototip yada numune parçalar) durumlarda kalıba göre hızlı ve ucuz olduğu görülmektedir .

Deney sonuçları ele alındığında;

- Kesme hızındaki azalmayla ve kesme gazı basıncı artışıyla parçadaki ısıdan etkilenen bölge derinliği artmaktadır.
- Güç değeri için ısıdan etkilenen bölge derinliğini minimize eden bir değer söz konusudur.
- Kesme hızındaki artmayla ve kesme gazı basıncı artışıyla parçanın kesme yüzey kalitesi düşmektedir.
- Güç değeri için yüzey pürüzlülüğünü minimize eden bir değer söz konusudur.
- Kesim bölgelerinde keskin köşe ve kenarlar deformasyona uğramaktadır.
- Uygun parametreler sayesinde N9 sınıfı yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılabilmektedir.
- Deney sonuçları incelendiğinde 3.2 nolu parçada (%60 güç , 0.5 bar kesme gazı basıncı, 1500 mm/dak kesme hızı) optimum kesme şartlarının sağlandığı görülmektedir.
- Sonuç olarak otomotiv sektöründe kullanılacak sac parçaların, parametreler uygun ayarlandığı takdirde lazer ışını ile kesme yöntemi ile imal edilmesinde herhangi bir çekince olmadığı görülmüştür.
- Yapılan maliyet analizinde üzerinde deney yapılan numune parça için kalıp yapımının gerekliliği istenen sayının 6500 adetten fazla olması durumunda ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adams, M.J. 1968**, Laser Welding. British Welding Institute Reseach Bull. London , Sept: 9
- Anonim**, Operators Manual. Laser Processing. Bystronic AG Niedrönz/Switzerland 1996: 2-14
- Anonim, 1968** Laser Processing. Laser Focus. New Hampshire; 4: 16 .
- Arata, Y., I. Miyamoto and M. Kubota, 1969** IIW Document, Dept. Welding Eng., Osaka Univ.;
- Asmus, J.F. and F.S. Baker, 1969** Tenth Symposium On Electron. Ion And Laser Beam Technology. L. Marton, Ed.; San Francisco Press, San Francisco: 241
- Barber, R.B. and D.L. Lin, 1969** Tenth Symposium On Electron. Ion And Laser Beam Technology. L. Marton, Ed. ; San Francisco Press, San Francisco: 225
- Bod, D., R. E. Brasier And J. Parks, 1969** Laser Cutting. Laser Focus. New Hampshire 19; 5: 36
- Boyd, G. D. and J. P. Gordon, 1961** Bell System Tech. New Jersey 1961: P 40, 489
- Brandli, H.F., M. Keller and A. Roulier, 1967** Drilling Material with Laser Beam. Laser Focus New Hampshire 1967; 5: 26
- Carslaw, H. S. And J. C. Jaeger, 1959** Conduction Of Heat İn Solids. 2nd Ed. Oxford Univ. Press Oxford : P 75, 264, 113, 30
- Cohen, M.I., 1967** Laser Processing. J. Franklin Inst. Princeton, N.J.: P 283, 271
- Cohen, M.I., 1969** Electronic Equipment News. Princeton, New Jersey : 6
- Cohen, M.I. and J.P. Epperson, 1968** Advances In Electronics and Electron Physics. L. Marton, Ed; Academic Press, Supp. Princeton, N.J.: 4
- Cohen, M.I., Arecchi, F.T. and Schulz-Dubois E.O., 1972** Laser Handbook, F4 Material Processing Volume 2, North-Holland Publ. Co., Amsterdam : P 1579-1605 s.
- Fork, R.L., D.R. Herriott and H.W. Kogelnik, 1964** Appl. Optics, Newyork ; 3: 1471
- Gaghano, F. P., R. M. Lumley and L.S. Watkins, 1969** Proc. Ieee. NewYork ; 57: P 2, 114
- Grzywa, J. C. and A. Chesko, 1966** Wire And Wire Production, Princeston, N.J. : 41
- Güleç, Ş. ve Çapa, M. 1995** Metallerin Yüzey İşlemleri ve Özel İmalat Yöntemleri. İTÜ İstanbul : S 14-15
- Haun Jr., R.D., 1968** Ieee Spectrum. Newyork; 4: 82
- Kogelnik, H.W.,1965** Bell System Tech. N.J. ; 44: 455
- Kogelnik, H.W., 1966** İn: Lasers. A.H. Levine, Ed. Dekker, N.Y. 1966: P 1, 295
- Lin, T.P., 1967** IBM J. Research and Development. NewYork ; 11: 527

- Longfellow, J. And D.J. Oberholzer, 1969** Ieee International Convention New York .
- Moran, J. M., 1971** Applied Optics N.Y.; P 10, 412
- Namba, S. and P.H. Kim, 1964** Japan J. Appl. Physics. Osaka Univ. ; 3: 536
- Namba, S. and P.H. Kim, 1966** Scientific Papers Of The Inst. Of Physical And Chemical Res.: P 60, 91
- O'hara, D.J. and A. D. Tencza, 1969** IBM Tech.Disclosure Bull. II : 1168
- Ready, J.F., 1964** Proc. National Electronics Conf. London.; 22: 67
- Ready, J.F., 1965** Physical Review , Oxford univ. Pres ; 137: A620
- Ready, J.F., 1970** Machining with Laser Beam. Laser Focus New Hampshire ; 6: 38
- Rykahn, N.N. and Y.L. Krasulin, 1966** Soviet Phys. Doklady. Moscow : P163, 87;
- Schwarz, H. and A.J. De Maria, 1962** Proc. National Electronics Conf. Boston; P 18, 351
- Smith, J.F., 1969** Appl. Optics. Laser Focus. N.Y.; 5: 32
- Spitz, H.Y., 1969** Tenth Symposium On Electron. Ion, And Laser Beam Technology. L. Marton, Ed. ; San Francisco Press : 233
- Verber, C.M. And A.H. Adelman, 1965** J. Appl. Phys. San Francisco Pres ; P 36, 522
- Williams, D. L., 1965** Eng. Proc. New Indust. Technol., Penn. Univ. : P 2,77

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bana her konuda yardımını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Nurettin YAVUZ' a ve tez çalıőmalarım sırasında bana yardımcı olan herkese teőekkürü borç bilirim .

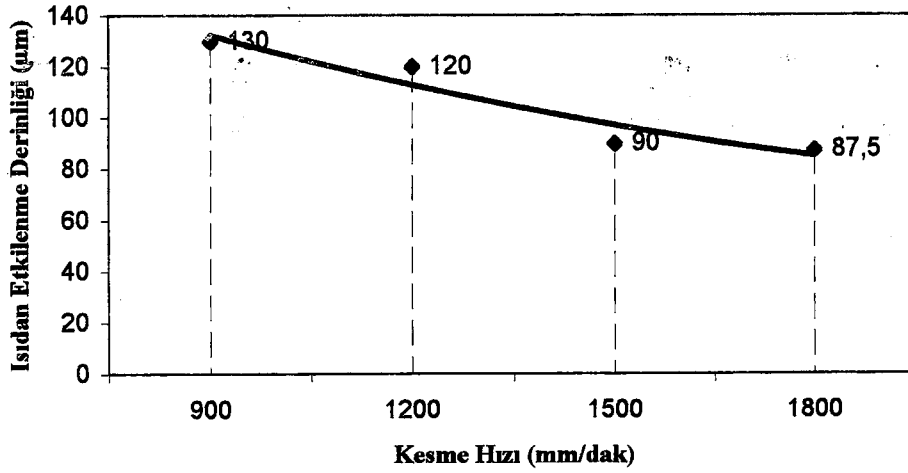
Muhammed Ahmet TANRIVERDİ



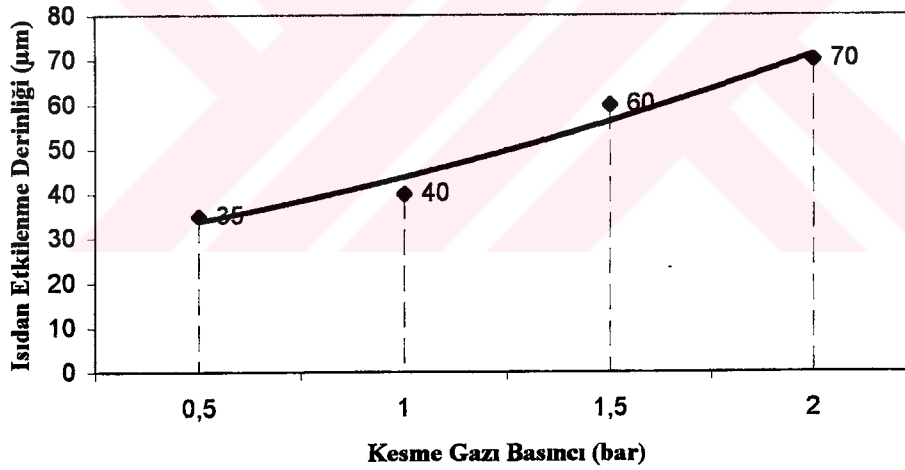
ÖZGEÇMİŞ

1975 yılında Bursa'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Bursa'da tamamladı. 1992 yılında Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine mühendisliği Bölümünü kazandı. 1996 yılında lisans eğitimini tamamlayıp 1998 yılında Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. Özel sektörde çeşitli kuruluşlarda çalıştı.





Şekil 4.13 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 nolu parçaların Kesme Hızı-Isıdan etkilenen bölge derinliği grafiği (Güç %60 ve kesme gazı basıncı 2.5 bar sabit).



Şekil 4.14 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 nolu parçaların Kesme gazı basıncı – Isıdan etkilenen bölge derinliği grafiği (Güç %60 ve kesme hızı 1500 mm/dak sabit).