

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LASER KESİM PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Faruk SOYDAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LASER KESİM PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ
İLE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Faruk SOYDAN
(503091332)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celaletdin ERGUN

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503091332 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi **Faruk SOYDAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LASER KESİM PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cihan DEMİR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **13 Aralık 2014**
Savunma Tarihi : **23 Ocak 2015**

Anneme,

ÖNSÖZ

Sunulan yüksek lisans tez çalışması kapsamında, laser kesim parametrelerinin değişiminin laser kesime olan etkisini anlamak ve laser kesim parametrelerinin optimizasyonunu sağlayacak bir sonlu elemanlar model oluşturulması hedeflenmiştir. Bu kapsamda parça kalınlığı, kesme hızı, kesme gücü ve malzeme değerlerini değişken olarak kabul eden bir model Ansys APDL-R14.5 kullanılarak kurulmuştur. Bu yüksek lisans tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştiri ve önerileri ile katkıda bulunan, her fırsatta yardımını esirgemeyen değerli hocam Sn. Prof. Dr. Celaletdin ERGUN'na teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca her şart altında desteklerini bende esirgemeyen Aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak 2015

Faruk SOYDAN
(Makina Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY.....	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Araştırması	1
2. LASER.....	3
2.1 Laserin Tanımı	3
2.2 Laser Işınının Özellikleri	6
2.3 Optik Esaslar	12
2.3.1 Işığın yansıması.....	12
2.3.2 Işığın kırılması	13
2.3.3 Prizmalar	14
2.4 Laser Işınının Malzeme İle Etkileşimi.....	16
3. LASER TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMA ALANLARI.....	27
3.1 Giriş	27
3.2 Laser Kaynağı	28
3.2.1 Düşük güçlü laser ile dikiş kaynak yöntemi	29
3.2.2 Yüksek güçlü laser ile dikiş kaynak yöntemi.....	33
3.3 Laser İle Yüzey Sertleştirme.....	37
3.4 Laser İle Delik Delme.....	41
3.5 Laser İle Markalama.....	46
3.6 Laser İle Kesme.....	48
3.6.1 Laser ile süblimleştirerek kesme	49
3.6.2 Laser ile yakarak kesme.....	50
3.6.3 Laser ile ergiterek kesme	51
3.6.4 Laser ile metalik olmayan malzemelerin kesimi.....	52
3.6.5 Laser ile metalik malzemelerin kesimi	54
4. LASER KESİM PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN SONLU	57
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ.....	57
4.1 Parametrelerin Belirlenmesi ve Geometri.....	57
4.2 Mesh Atılması Ve Modelleme	59
4.3 Laser Kesim Parametrelerinin Sonlu Elemanlar İle Analizlerinin Sonuçları ..	61
4.3.1 Analiz 1-2-3	61
4.3.2 Analiz 4-5-6	64
4.3.3 Analiz 7-8-9	66
4.3.4 Analiz 10-11-12.....	68

4.3.5 Analiz 13-14-15	70
4.3.6 Analiz 16-17-18	72
4.3.7 Analiz 19-20-21	74
4.3.8 Analiz 22-23-24	76
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	79
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

KISALTMALAR

h	: Plank sabiti
V	: Frekans
k	: Soğurma kat sayısı
x	: Derinlik
I_x	: x derinliğindeki güç yoğunluğu
I₀	: Başlangıçtaki güç yoğunluğu
W₀	: Laser ışınının yarı çapı
n₁	: Birinci ortam indisi
n₂	: İkinci ortam indisi
K	: Isıl iletim kat sayısı
c	: Malzeme özgül ısısı
t	: Zaman
d	: Yoğunluk
D	: Nüfuziyet derinliği
R	: Yansıtma kat sayısı
t_B	: Buharlaşmanın başlaması için geçen süre
T_B	: Buharlaşma sıcaklığı
T₀	: Ortam sıcaklığı
F	: Soğurulan laser ışınının güç yoğunluğu
E₀	: Laser darbe enerjisi
A	: Laser ışınının etki ettiği alan
L	: Latent ısı
V_L	: Laser kesme hızı
X_L	: Laser ile kesilen mesafe
Θ	: Laser ışınının ıraksama açısı
λ	: Dalga boyu
α	: Işının gelme açısı
β	: Yansıma açısı
φ	: Aynanın dönme açısı
Θ₁	: Gelen açı
Θ₂	: Kırılma açısı
TTT	: Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
TEM	: Güç Yoğunluğu Dağılımı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yaygın kullanılan laser türlerinin ıraksama açıları	11
Çizelge 2.2 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin termal yayılımı	17
Çizelge 2.3 : Güç yoğunluğuna bağlı olarak yaygın kullanılan bazı malzemelerin buharlaşmaya başlaması için geçen süreler	22
Çizelge 3.1 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin laser kaynağı için özelliklerinin kıyaslanması	32
Çizelge 3.2 : Farklı alaşım elementleri içeren parçaların birbirine laser ile kaynak edilebilirliğe elementlerin etkisi	32
Çizelge 3.3 : Yüksek güçlü laser kaynağının bazı özelliklerinin diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslanması.....	37
Çizelge 3.4 : Laser türlerinin dalga boyları ve yaygın olarak kullanıldıkları imalat yöntemleri.....	42
Çizelge 3.5 : Laser ile delik delme yönteminin diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları	46
Çizelge 3.6 : Laser ile kesmeye ait örnekler	48
Çizelge 3.7 : Yaygın olarak kullanılan bazı plastik malzemelerin laser ile kesiminde oluşan yüzey kaliteleri	53
Çizelge 3.8 : Yaygın olarak laser kesim metodunun uygulandığı malzemelere ait parametreler	54
Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan malzemelerin yoğunluk, ısı iletim kat sayısı, özgül ısı ve ergime sıcaklıkları	59
Çizelge 4.2 : Analizlerde kullanılan parametreler	59
Çizelge 4.3 : Analizlerde kullanılan parametreler	61
Çizelge 4.4 : 1-2-3 nolu analiz sonuçlarının özeti	63
Çizelge 4.5 : 4-5-6 nolu analiz sonuçlarının özeti	65
Çizelge 4.6 : 7-8-9 nolu analiz sonuçlarının özeti	68
Çizelge 4.7 : 10-11-12 nolu analiz sonuçlarının özeti	70
Çizelge 4.8 : 13-14-15 nolu analiz sonuçlarının özeti	72
Çizelge 4.9 : 16-17-18 nolu analiz sonuçlarının özeti	74
Çizelge 4.10 : 19-20-21 nolu analiz sonuçlarının özeti	76
Çizelge 4.11 : 22-23-24 nolu analiz sonuçlarının özeti	78
Çizelge 5.1 : Kesme hızının etkisinin kıyaslanması	800
Çizelge 5.2 : Kesme gücü etkisinin kıyaslanması	8181
Çizelge 5.3 : Kalınlık etkisinin kıyaslanması.....	811
Çizelge 5.4 : Malzeme değişikliği etkisinin kıyaslanması	822

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Laser oluşum şeması	3
Şekil 2.2 : Hidrojen atomunun enerji uyarı seviyeleri.....	4
Şekil 2.3 : Kendiliğinden yayınım.....	5
Şekil 2.4 : Uyarılmış ışımanın oluşumu	6
Şekil 2.5 : Laser ışının hareket şeması	7
Şekil 2.6 : Laser güç yoğunluğunun odaklanma mesafesine bağlı olarak değişimi....	8
Şekil 2.7 : Yaygın olarak kullanılan laser türlerinin dalboyları ve bulundukları bölgeler	9
Şekil 2.8 : Laser ışınının ıraksama eğilimi hesaplanmasında kullanılan değerler	10
Şekil 2.9 : Laser ışınının güç yoğunluğunun dağılımı.....	11
Şekil 2.10 : Laser ışınının güç yoğunluğu dağılımı	12
Şekil 2.11 : Aynanın açısal değişiminin gelen ve yansıyan ışın açısına olan etkisi....	13
Şekil 2.12 : Ortam değiştiren ışığın kırılması ve yaptığı açılar	14
Şekil 2.13 : Dik prizmanın farklı yüzeylerine farklı açılar ile giren ışınların, çıkış yüzeyleri ve açıları.....	15
Şekil 2.14 : Dik prizmanın farklı yüzeylerine farklı açılar ile giren ışınların, çıkış yüzeyleri ve açıları.....	15
Şekil 2.15 : Nikel bir parçanın 10^5 W/cm^2 güç yoğunluğundaki laser ışınına maruz kaldığı durumda ergime derinliğinin değişim grafiği	18
Şekil 2.16 : Farklı güç yoğunlukları için zamana bağlı ergime derinliği grafiği	19
Şekil 2.17 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin laser dalga boylarına göre yansıtıcılık özellikleri grafiği	20
Şekil 2.18 : Malzemenin zaman bağlı olarak laser ışınına yansıtma oranının değişim grafiği	21
Şekil 2.19 : Alüminyum, bakır ve nikel'in zamana bağlı olarak ergime yüzdesi	23
Şekil 2.20 : Laser gücüne bağlı olarak plasma oluşumunun kütle boşaltmaya olan etkisi.....	24
Şekil 2.21 : Laser kesimde plasma oluşum aşamaları	24
Şekil 2.22 : Güç yoğunluğu ve darbe süresine bağlı olarak seçilecek imalat yöntemi	25
Şekil 3.1 : 375 W'lık laser gücü ile iki farklı malzemenin hıza bağlı nüfuziyet derinliği grafiği.....	30
Şekil 3.2 : Nüfuziyet derinliğinin kaynak hızı ve güce bağlı olarak değişimi	31
Şekil 3.3 : Malzeme kalınlığına bağlı olarak laser kaynak toleransları.....	33
Şekil 3.4 : Nüfuziyet derinliğinin laser gücüne bağlı olarak değişimi	34
Şekil 3.5 : Klavuz delik açarak gerçekleştirilen yüksek güçlü laser kaynak yönteminin şematığı	35
Şekil 3.6 : %0,8 karbon içeren çeliğin sıcaklık, zaman, dönüşüm grafiği.....	38
Şekil 3.7 : 1040 karbon çeliğinin yüksek güçlü CO ₂ laseri ile sertleştirilmesi.....	39
Şekil 3.8 : 0,56mm sertleştirme derinliğine sahip karbon çeliğinin Harth diyagramı.....	40

Şekil 3.9 : Ruby darbeli laseri ile alüminyum üzerine farklı farklı açılan üç deliğin geometrisi	43
Şekil 3.10 : Laser ile delinmiş tipik bir delik formu	44
Şekil 3.11 : Laser ile markalama yönteminin çalışma şeması.....	47
Şekil 3.12 : Laser ile markalama yapılan parça örnekleri	48
Şekil 3.13 : Laser ile süblimleştirerek kesme şeması.....	50
Şekil 3.14 : Düşük karbonlu çeliğin farklı kalınlıkları için kesme hızı ve kesme gücü fonksiyonu	55
Şekil 3.15 : 1 kW'lık CO ₂ laserinin düşük karbonlu çeliğin kesimindeki minimum ve maksimum kesim hızının kalınlığa bağlı değişimi	56
Şekil 4.1 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın geometrisi ve ölçüleri.....	57
Şekil 4.2 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın et kalınlıkları....	58
Şekil 4.3 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın meshlenmesi	60
Şekil 4.4 : Mesh düğüm noktalarının numaralandırılması	60
Şekil 4.5 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.....	62
Şekil 4.6 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksen ekran görüntüsü	62
Şekil 4.7 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.....	63
Şekil 4.8 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.....	63
Şekil 4.9 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.....	64
Şekil 4.10 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksen ekran görüntüsü	64
Şekil 4.11 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	65
Şekil 4.12 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	65
Şekil 4.13 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.....	66
Şekil 4.14 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksen ekran görüntüsü	66
Şekil 4.15 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	67
Şekil 4.16 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	67
Şekil 4.17 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.....	68
Şekil 4.18 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksen ekran görüntüsü	68
Şekil 4.19 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	69
Şekil 4.20 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	69
Şekil 4.21 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.....	70
Şekil 4.22 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksen ekran görüntüsü	70
Şekil 4.23 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	71
Şekil 4.24 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	71

Şekil 4.25 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü	72
Şekil 4.26 : St-37 malzeme için yapılan analizin x ekseni ekran görüntüsü	73
Şekil 4.27 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	73
Şekil 4.28 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	74
Şekil 4.29 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü	75
Şekil 4.30 : St-37 malzeme için yapılan analizin x ekseni ekran görüntüsü	75
Şekil 4.31 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	75
Şekil 4.32 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	76
Şekil 4.33 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü	77
Şekil 4.34 : St-37 malzeme için yapılan analizin x ekseni ekran görüntüsü	77
Şekil 4.35 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	77
Şekil 4.36 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı	78
Şekil 5.1 : Kesme hızı etkisinin analiz görüntüleri	79
Şekil 5.2 : Kesme gücü etkisinin analiz görüntüleri.....	80
Şekil 5.3 : Kalınlık etkisinin analiz görüntüleri	81
Şekil 5.4 : Malzeme değişikliği etkisinin analiz görüntüleri	82
Şekil 5.5 : Kesme gücünün kesme yüzeyinde oluşan açığa etkisi	83

LASER KESİM PARAMETRELERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

ÖZET

Laser teknolojisi günümüzde kendisi için sanayide bir çok uygulama alanı bulmuştur. Laser teknolojinin malzeme kesme alanında kullanılması ile birlikte, kalıp yatırımını kurtarmayacak, karmaşık şekilli parçalar kolaylıkla ve ekonomik bir şekilde üretilme imkanı bulmaktadır.

Çalışmalar ilk olarak laser ışınının oluşma şekli, üretilen noktadan parça üzerine iletilme şekli ve laser ışını ile malzeme etkileşimi hakkında literatür incelemesi yapılarak başlanmıştır. Literatür incelemeleri sonrasında laser kesime etki eden parça kalınlığı, kesme hızı, kesme gücü ve malzeme etkisinin laser kesim prosesinin kalite ve verimine etki eden en önemli değişkenler olduğu belirlenmiştir.

Tez kapsamında laser kesimi en çok etkileyen parametreler olan parça kalınlığı, laser hızı, laser gücü ve malzemenin etkisini incelemek maksadı ile Ansys paket programı kullanılarak 3 boyutlu bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Analizler esnasında ergime sıcaklığının aşılması durumunda ergimenin oluşacağını gösterebilmek için, meshlerin öldürülmesi parametresi tanımlanmıştır.

Seçilen parametrelerden sadece parça et kalınlığının değişken olarak seçilmesi durumunda sabit olarak seçilen hız ve güç değerleri için ince parçanın sorunsuz olarak kesilmesi sağlanabilirken, kalın parçanın kesimi tam olarak gerçekleşmeyebilmektedir. Aksi durumda ise kalın parçanın kesilebilmesini mümkün kılacak kesme hızı ve gücü değerlerinin seçilmesi durumunda, ince parça üzerinde boşaltılan malzem miktarının artacağı, ITAB'ın genişleyeceği ve işlem veriminin düşeceği sonucuna ulaşılmaktadır.

Seçilen parametrelerden tüm değişkenlerin sabit tutulup, kesme hızının değiştirildiği durumda kesme hızının arttırılması durumunda ITAB'ın daha dar ve boşaltılan malzeme miktarının ise daha az olduğu gözlemlenmiştir. Ancak hızın arttırılması parçanın kesme yüzeyinde oluşan açıyı olumsuz yönde etkileyeceğinden verim ve kalite arasında bir optimizasyon yapılması gerekmektedir.

Seçilen parametrelerden sadece kesme gücünün değişken olarak alınması durumunda kesme gücünün yüksek olduğu analizlerde malzeme boşaltma miktarının ve ITAB'ın fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ancak yüksek güç kesme yüzeyinde oluşan açının azalması konusunda fayda sağladığı gözlemlenmiştir.

Malzeme değişikliğinin laser kesim işlemi üzerindeki etkisini incelemek için St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemeler seçilerek analizlerde kullanılmıştır. Yapılan analizlerde malzemenin ısı ilet katsayısının, yoğunluğunun ve özgül ısısının kesme yüzeyi, ITAB ve malzeme boşaltma miktarı üzerinde direk etkileri olduğu belirlenmiştir.

Ayrıca laser ile kesme işleminde kesme gücünün etkisini daha iyi anlayabilmek için 100W'tan başlayarak değişik aralıklarla 2000W'a kadar kesme gücü değiştirilmiştir. Analiz sonuçları ile kesme açısının belirli bir güç seviyesine kadar arttığı, belirli bir güç seviyesinin üzerinde ise açıda iyileşme olmadığı belirlendi.

ANALYSIS OF LASER CUTTING PARAMETERS WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In history of science, development of laser has been an important chapter. History of laser technology began with Albert Einstein in 1917. Stimulated emission concept which is utilized in lasers, was developed by Einstein.

The word “ laser” stands for “ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” The light emitted by a laser is electromagnetic radiation.

Properties of laser light specify the application area of lasers. These properties are monochromaticity, directionality, the spatial and temporal characteristics of laser beams, coherence properties, radiance, the capability to focus to a small spot, very limited heat affected zone occurrence, high efficiency and the high power levels.

Conventional lasers are well developed and widely available. These include gas lasers such as helium-neon, argon, CO₂, solid state lasers like Nd: YAG and semiconductor lasers. Although a laser was a fragile device, requiring considerable care and maintenance. At the present time, lasers became durable, reliable and reasonably economical to operate.

Intense pulses of light energy produced by laser leads to many applications involving heating, melting and vaporization. Lasers used in metal working is able to deliver very high values of irradiance to a workpiece.

The knowledge of physical processes that occur during the interaction of high power laser radiation with materials is important to understanding the capabilities and limitations of laser based material processing. When laser radiation strikes a target surface, part of laser beam is absorbed and part is reflected. The energy that is absorbed begins to heat the surface. The heating effects due to absorption of high power beams can occur very rapidly. The surface quickly rises to its melting temperature. Laser – induced melting is of interest because of welding applications.

Material processing refers to a variety of industrial operations. In these operations the laser operates on a workpiece to modify it, for example, by melting it or removing material from it. Some of the possible applications include welding, hole drilling, cutting, trimming of electronic components, heat treating, brazing and alloying.

Properties of laser light that enable material processing applications are its collimation, radiance, and focusability. Because of these properties, laser light can be concentrated by a lens to achieve extremely high irradiance at the surface of a workpiece.

Lasers may be used to cut or shape a wide variety of materials. Cutting means vaporization of material along a line, so as to separate the workpiece into separate parts. This method generally is used to cut plastic, wood, paper and ceramic

metaterials. Because these materials do not have observable melting point. For metal materials cutting means melting of metarial with high effecency.

In this study, firstly literature research including generation of laser beam , transfer of the laser beam from resonator to workpiece and laser beam properties, optical properties and interaction of laser radiation with materials is done. After then laser technology efficently used manufacturing processes are investigated. Among this process laser cutting process was focused on. When laser cutting method investigated particularly, lots of parameters affect cutting process considered and the most important parameters are defined as material properties, workpiece thickness, cutting velocity and cutting power. After investigated effect of this parameter and a 3D laser cutting model generated by using finite element method (FEM). The aim was to develop cutting surface quality and define the parameter values to obtain an efficient cutting process.

Different sheet metal thickness is used in industry because of different requirements. In this study, 1 mm and 2 mm material thickness is used as industrial demand. If only material thickness is changed (fix cutting velocity, cutting power and same material), cutting process is completed without problem for thiner work piece. Under same condition, Some problems can be observed for thick work piece cutting. Cutting surface angle can be bigger than thiner work piece cutting surface angle or laser can not be completely removed material. To solve these problems cutting power or cutting velocity can be increased. But at that time, heat affected zone and removed material will be increased. In this study, only 2 different metarial thickness is used to compare each other. But analysis model can produce sufficeient results to support different metarial thickness.

Another important parameter which used in analysis is laser cutting velocity. Cutting velocity must be fastest to increase efficiency and reduce unit cost. High velocity also decerase heat effected zone. All parameters are choosen as fix, only cutting velocity is changed from 1 m / min to 2 m / min for some analysis to understand effect of the cutting velocity. If cutting velocity is increased, heat affected zone and removed material will be decreased. But higher cutting velocity has bad effect on the cutting surface angle. Cutting velocity very important parameter on the laser cutting performance. To decrease cutting time, higher cutting velocity should be choseen. But cutting surface angle should be taken precaution. In this study, only two different velocity is used, but model can support different cutting velocities which used in the industry.

Laser cutting power is another important parameter. It affects efficiency, unit cost , heat effected zone and cutting angle directly. All parameters are choosen as fix, only cutting power is changed from 1000W to 2000W in some analysis to show affect of cutting power. Only According anaysis, when higher laser power is used, removed material and heat affected zone are larger than other. To increase efficiency and reduce removed material value, lower cutting power level should be used. But lower cutting power increases angel on the cutting surface. So an optimisation is neccesary between efficiency and cutting angle. 1000W and 2000W cutting powers are used to define effect of cutting power. But different cutting powers can be used in this model. Extra analysis (8 different analysis) are performed from 100 W to 2000W to show model capability. And model solved all of the analysis with sufficient results.

Different materials are used in the industry as a machine part. So laser cutting process must be applicable method for different materials to support industrial demands. Otherwise laser cutting method can be used for only special purpose applications. St-37, AISI304 and Al 2024 are the most preferred materials in the industry. St-37, AISI 304 and Al 2024 materials have been used to analysis for investigate material effect on the laser cutting operation. Those materials have different melting temperature, coefficient of thermal conduction, specific heat and density. According to analysis results, material heat conductivity, density, specific heat cutting surface have been directly affected on the heat affected zone and material cutting ratio.

Additional analysis are performed to understand effect of power change on the cutting surface angle. Analysis are repeated for 100 W, 250 W, 300 W, 400 W, 500 W, 900W, 1000 W and 2000 W. All of the other parameters were same to compare analysis results. When we compare analysis results, effect of the cutting power is observed clearly.

1. GİRİŞ

Tez kapsamında laser ile kesme işlemi üç boyutlu olarak modellenmiş ve kesme hızı, güç yoğunluğu, kalınlık ve malzeme gibi parametrelerin değiştirilmesi durumunda kesme işleminin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Parametrelerin değişiminin sonuca etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için her bir adımda sadece bir değişken değiştirilerek, analiz sayısı artırılmış ancak mukayesenin daha doğru sonuçlar ile yapılması sağlanmıştır. Sonlu elemanlar paket programı olarak Ansys APDL - R14.5 kullanılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Çalışmanın amacı seçilen kesme hızı, güç yoğunluğu, kalınlık ve malzeme parametrelerinin laser kesim işlemine olan etkisinin incelenerek optimum kesme koşullarının belirlenmesine katkı sağlayacak bir model oluşturmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Laser kesimin sonlu elemanlar modelinin kurulmasını zor kılan en önemli neden termal olaylar esnasında ergimenin olması ve bu işlemi etki eden parametrelerin birden fazla olmasıdır. Laser kesim olayına doğrudan etki eden parametreleri malzeme özellikleri, kesimin yapılacağı parçanın et kalınlığı, kesme hızı, kesme gücü, darbe süresi ve gaz ortamını oluşturan gazın cinsi ile gaz basıncı olarak sıralamak mümkündür. Bu bölümde laser kullanılan imalat yöntemlerinde malzeme, kalınlık, kesme hızı ve kesme gücü ile sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çalışmalar incelenmiştir.

Acherjee, Kuar, Mitra ve Misra 2010 yılında mikro kaynak yönteminde laser kaynağı kullanımını incelemiş ve sonlu elemanlar metodu ile sıcaklık dağılımını modellemiştir. Modelde parça içerisine ısı iletim katsayısına bağlı olarak iletilen ısı ve ortaya çıkan sıcaklıklar incelenmiştir. Seçilen parametreler çerçevesinde sıcaklığın kaynak için yeterli seviyeye ulaşıp ulaşmadığı kontrol edilmiştir. Çalışmada

malzeme, hız ve güç sabit olarak seçilmiş ve değiştirilmelerinin etkisi incelenmemiştir [1].

Yan ve Li seramik malzemelerin laser ile kesimleri esnasında ortaya çıkan termal gerilme sonucu oluşan kırılmaları incelemiştir. Çalışmalarında Al_2O_3 seramik için 3 boyutlu bir sonlu elemanlar modeli oluşturmuşlar ve malzeme üzerinde ısı tesiri sebebi ile oluşan gerilmeleri sabit hız, malzeme ve güç değeri için hesaplamışlardır. Çalışmada termal gerilmenin en yüksek olduğu noktalar ile gerçekte oluşan kırılar karşılaştırılmış ve termal gerilmenin en yüksek olduğu noktalar da çatlaklar tespit etmişlerdir [2].

Modest yaptığı çalışmada 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kurarak parça içerisinde laser kaynağının hareketine bağlı olarak parça üzerindeki ısı dağılımını incelemiştir. Kurulan modelde kesme formunu içeren bir geometri oluşturulmuş ve bu geometri üzerine ısı gönderilmiştir. Çalışmada ergime analiz esnasında oluşturulmayıp, geometri tanımlanırken, belirlenen bir kesme geometrisi verilmiştir[3].

Rao, Wu, Du ve Lu'nun 2011 yılında yaptıkları çalışmada laser ile mikro delik delme işlemini için 3 boyutlu bir model kurmuşlar ve laser gücünü değiştirerek ergimenin olduğu noktaları belirlemişlerdir. Bu sayede güce bağlı olarak oluşacak kesim formunu tahmin etmeye çalışmışlardır[4].

Park ve Joo Na 2009 yılında yaptıkları çalışmada laser ile delik delme işlemini bilgisayar destekli analiz yöntemi ile incelemiştir. Çalışmasında darbe sayılarının kesme derinliğine olan etkisini incelemiştir[5].

Türkoğlu, Ersoy, Canbaz ve Aktürk çalışmalarında femtosaniye laser ile metale delik delme işlemini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada darbe sayısının delik derinliğine ve formuna olan etkisini 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kurarak ve deneysel sonuçları da birbiri ile kıyaslamışlardır. Sonuç olarak sabit bir güç ve sıfır hız için laser ile delik delme yönteminde pulse sayısına bağlı olarak oluşacak delik formu ve derinliği deneysel çalışmalara yakın ölçülerde tahmin edilmesi sağlanmıştır[6].

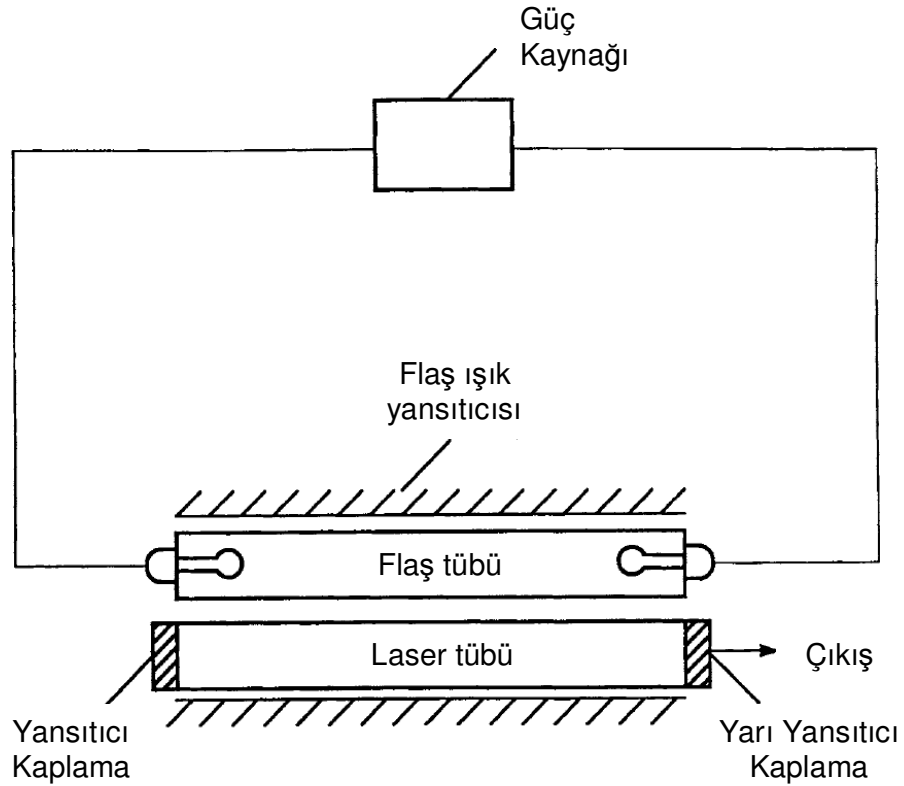
Ji, Bao ve Jiang çalışmalarında Al_2O_3 seramik malzemenin laser ile kesimini incelemişler ve kaliteyi iyileştirmek için mikro yapı ve katılaşmayı ele almışlardır. Çalışmada 1500mm/dak hız ve 200W'lık güç değerlerini seçerek Ansys sonlu elemanlar paket programında model oluşturmuşlardır. Oluşturulan model ile parça üzerindeki sıcaklık dağılımını incelemişlerdir[7].

2. LASER

2.1 Laserin Tanımı

Laser akronim yazım kuralı ile Light Amplification by Stimulated Emission of Radition cümlesindeki kelimelerin baş harflerinden oluşmuş olup “ışınlandırmanın uyarılmış yayımı ile ışığın kuvvetlendirilmesi” olarak tercüme edilmektedir[8].

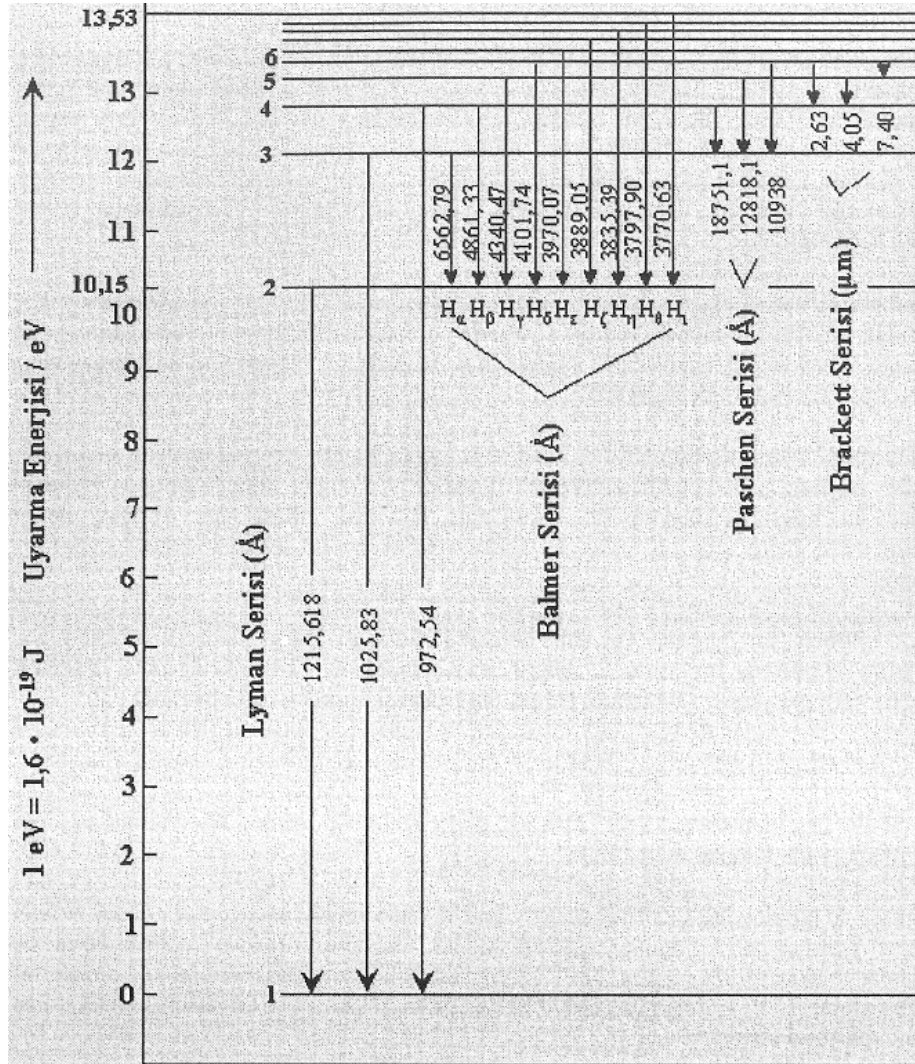
Laser ışını üretmek için termodinamik dengede olan bir konumdan aktif laser ortamına enerji transfer edilmelidir. Tam ve kısmi yansıtıcı aynalara sahip olan resonatör, yükseltgen enerjinin bir kısmını laser etkisi ile elektro manyetik bir ışın olarak yönlendirmektedir. Tipik laser oluşum şeması Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Laser oluşum şeması [9].

Bir atom uyarılmış bir durumdayken kararlı olmadığından yaklaşık 10^{-8} saniye içinde temel durumuna geri döner. Yüksek bir enerji uyarı seviyesinden daha düşük bir seviyeye kademeli olarak geri dönen atom iki seviye arasına denk gelen enerjiyi dalga paketleri halinde yayar.

Enerji seviyeleri şeması her bir element için farklı olup, söz konusu elementin karakteristik özelliğini oluşturmaktadır. Hidrojen atomunun enerji uyarı seviyeleri Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

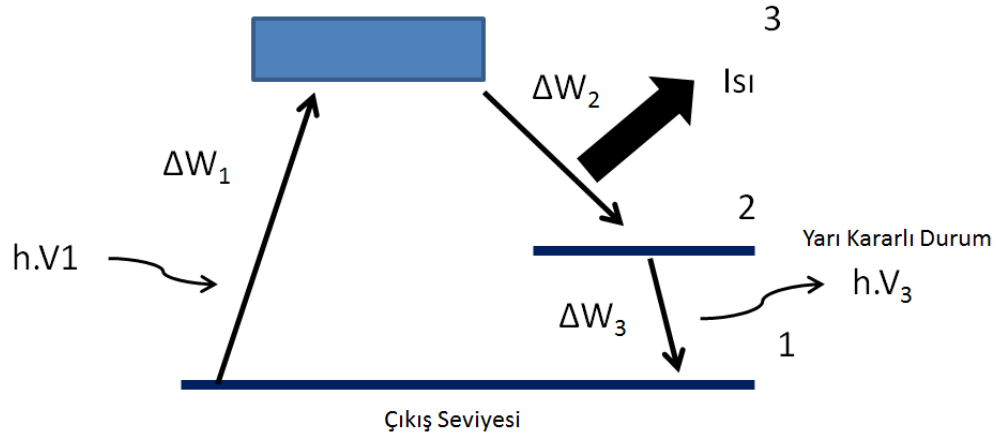


Şekil 2.2 : Hidrojen atomunun enerji uyarı seviyeleri [10].

Radio dalgaları ile ışık dalgaları her ikisi de elektromanyetik dalga yayılımı olup frekansları, dolayısıyla dalga boyları farklıdır. Her bir darbenin enerjisi $h \cdot V$ kadardır. Buna göre sürekli olarak algılanan ışık, gerçekte milyonlarca küçük enerji paketlerinden oluşmaktadır.

Laser ışını; atomların, iyonların veya moleküllerin yüksek bir enerji durumundan düşük bir enerji durumuna geçişleri ile oluşmaktadır. Bir atom bir fotonu soğuracak olursa uyarılmış hale gelir. Ne var ki, bu durum sadece foton enerjisinin o anda ki enerji seviyesi ile yükseleceği seviye arasındaki farka eşit olması durumunda mümkün olmaktadır. Fotonun frekansı çok düşük olunca, atomu uyarı durumuna getirecek kadar enerjiye sahip olamaz. Buna karşın fotonun frekansı çok yüksek olduğunda soğurulma olayı ender gerçekleşir.

E_2 uyarı durumunda bulunan bir atomun doğal ömür süresi sonunda E_1 uyarı durumuna geri dönüşü durumunda $E_2 - E_1$ kadar enerji içeren bir foton yayar. Bu durum “kendiliğinden yayınım” olarak adlandırılır. Bu durum Şekil 2.3’de şematize edilmiştir.

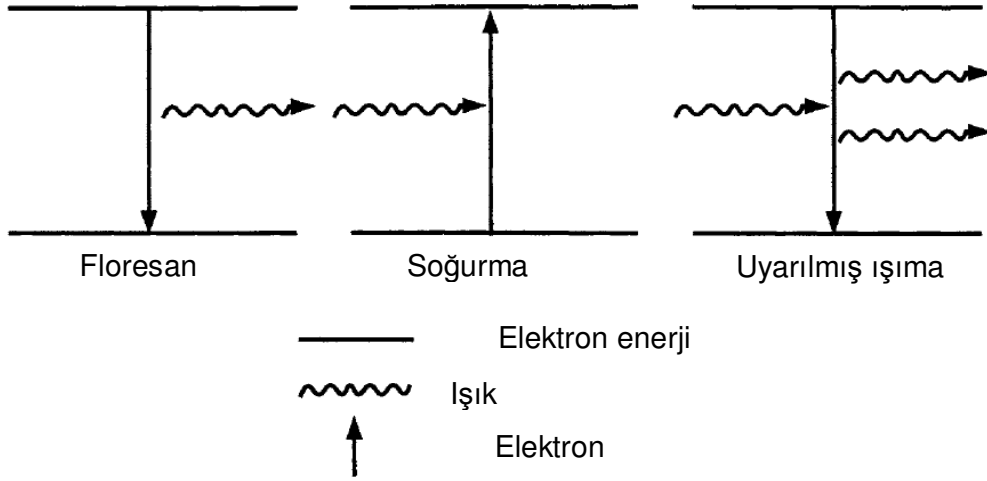


Şekil 2.3 : Kendiliğinden yayınım.

Böylesine bir yayınım $E_2 - E_1$ enerjisine sahip bir fotonun dışarıdan bir atoma rastlaması halinde, doğal ömür sona ermesede gerçekleşebilmektedir; çarpışma sonunda eşit enerjiye sahip iki foton yayınır. Bu iki foton aynı fazda olup, aynı yönde yayınmaktadır. Bir fotonun çarpması ve iki fotonun açığa çıkması ile tanımlanan bu yayınım ise “ uyarılmış yayınım” olarak tarif edilmektedir. Şekil 2.4’te ’de bu durum şematize edilerek gösterilmiştir.

Maddenin soğurma katsayısı k , madde içinden geçen bir düzlem dalganın x eksenı boyunca şiddet değişimi olarak tanımlanır. Bu değişim aşağıdaki bağıntı (2.1) ile tanımlanmaktadır.

$$I_x = I_0 \cdot e^{-kx} \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 : Uyarılmış ışımaya oluşumu [11].

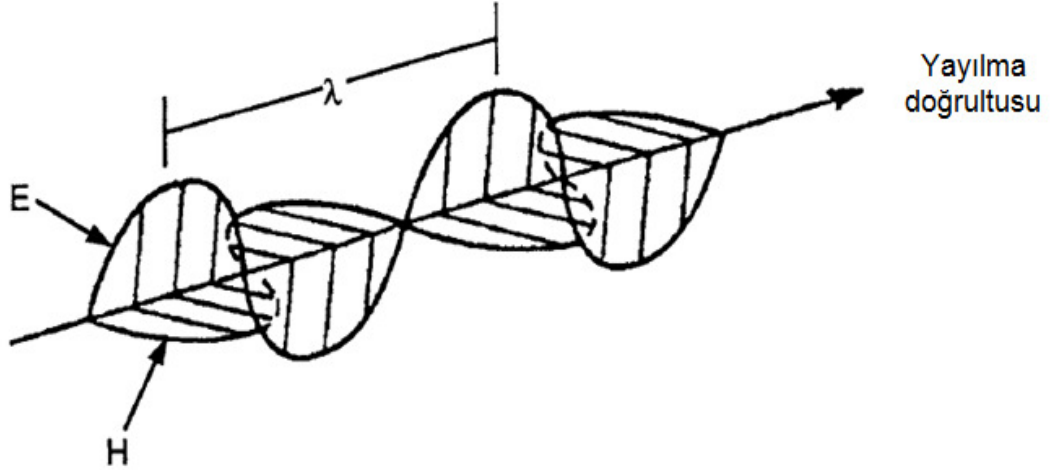
T sıcaklığında dengede olan atomlar için soğurma katsayısı pozitif olup, ısı dengede halinde bulunan bir maddeden geçen elektromanyetik dalgaların çıkış şiddeti, giriş şiddetinden daha azdır. Buna göre bir madde içinden geçen elektromanyetik dalgalar bazı atomları uyararak ışımaya zorlasa bile, bu ışımaya diğer atomlar tarafından yutulurken tamamen soğurulma olayı hakim olacaktır. Sonuç olarak; bir ortamın atom veya molekülleri bir elektromanyetik dalga tarafından ne kadar uyarılacak olursa olsun, elektromanyetik dalga madde içinden geçerken mutlaka yutulmaya uğrayacaktır.

Bir elektromanyetik dalganın bir ortam içinden geçerken yutulmaya uğramadan şiddetlenerek çıkabilmesi için o ortamın “k” soğurma katsayısının negatif olması gerekmektedir. Böyle bir ortamın oluşabilmesi için, elektromanyetik dalganın, uyararak ışımaya mecbur ettiği atom veya molekül sayısının, uyarılmamış atom veya molekül sayısından daha çok olması gerekmektedir.

2.2 Laser Işınının Özellikleri

Laser ışını, diğer tüm konvansiyonel kaynakların yaydığı ışığa göre şiddet, yönlendirilebilirlik, uyumluluk ve bant genişliği bakımından üstünlüklere sahiptir. Adı geçen bütün bu özellikler birbirinden bağımsız değildirler. Çünkü yönlendirilebilirlik özelliği, uyumluluğun yanıl bir görünüşü iken, bant genişliği

uyumluluğun boyca bir görünüşüdür. Buna karşın bu özelliklerin laser ışını üzerindeki etkileri bakımından durumları göz önüne alınacak olursa her birinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. Şekil 2.5'te laser ışının hareketi şematize edilmiştir.

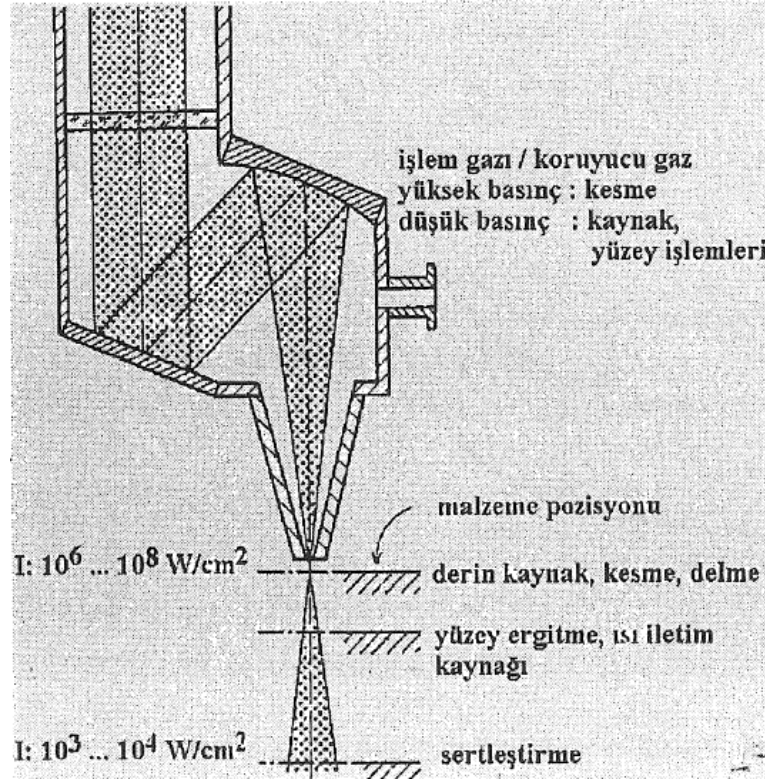


Şekil 2.5 : Laser ışının hareket şeması [12].

Bir ampul içindeki wolfram teli gibi konvansiyonel ışık kaynakları istatistiki zaman aralıkları ile enerji üretirler. Uyarılan bir wolfram atomu bir fotonu çevreye yayarak kendi kendine bir önceki enerji düzeyine geri döner ve yeni bir uyarı beklemeye başlar. Beklenen yeni uyarı hemen olabileceği gibi, uzun bir süre sonra da gerçekleşebilir. Bekleme süresince diğer atomlar foton yayımlamaya devam ederler. Bu yöntemle elde edilen ışık bir demet haline getirilerek bir malzeme üzerine (çelik gibi) yönlendirilebilirse, düzensiz bir foton yığını ile karşılaşılır. Fotonlar malzeme üzerinde sürekli aynı noktaya çarpmayıp, wolfram telin şekline bağlı olarak belirli bir bölgede dağılırlar. Enerji geniş bir zaman aralığına ve büyük bir hacme dağıldığından, güç yoğunluğu çok düşük seviyede kalmaktadır. Buna karşın laser ışınında fotonlar tek, ince ve yüksek genlikli bir ışılda birleşirler. Milyonlarca fotonun, laser darbelerinin son derece kısa süre içinde malzeme üzerindeki dar bir alana çarpması mümkün olur. Bu da enerji yoğunluğunu arttırdığından malzemelerin laser teknolojisi ile işlenebilmesine olanak sağlamaktadır.

Hassas işlemlerde kullanılan laser ışınları, çok küçük çaplarda odaklanabilirler; örneğin 0,1 mm'lik bir çapa odaklanabilmektedir. Laser ışınının güç yoğunluğu, ışın kaynağından çıkışta malzemenin termal olarak işlenebilmesi için yeterli düzeyde değildir. Laser kaynağına göre değişmekle birlikte ışın kaynağından çıkmakta olan

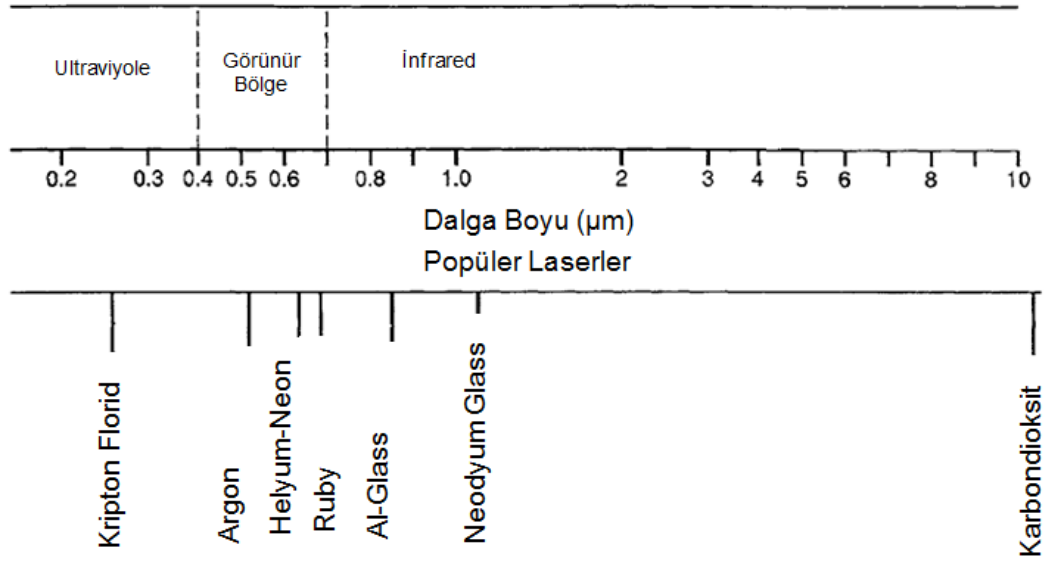
laser ışınının güç yoğunluğu 10^3 W/cm^2 'dir. Işının odaklanması ile güç yoğunluğunun artırılması mümkün olmaktadır. Laser ışın yarıçapının 0,5 mm'nin altına düşmesi durumunda, $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ gibi gerekli olan büyük bir güç yoğunluğu aralığı elde edilmektedir. Şekil 2.6'da laser güç yoğunluğunun odaklanma mesafesine bağlı olarak değişimi verilmiştir.



Şekil 2.6 : Laser güç yoğunluğunun odaklanma mesafesine bağlı olarak değişimi [13].

Laser ışını monokromatiktir. Yani tek renklidir. Dalga boyu ve laser özelliği belirli olan elektromanyetik dalgadan oluşur. Fotonların dalga boyunun çok dar bir alanda toplanmış olması, laser ışının tek renkli olması sonucunu doğurmaktadır. Malzeme işlemek için kullanılan farklı tipte laserler olmasına karşın kullanılmakta olan laserlerin önemli bir bölümünün dalga boyları kızılötesi alanda bulunur ve bu sebeple insan gözü tarafından algılanmamaktadır ($> 0,7 \mu\text{m}$). Sanayi ve üretimde en yaygın kullanım alanına sahip CO_2 laserinin dalga boyu $10,6 \mu\text{m}$ olup; kızıl ötesi bölgede yer almaktadır.

Laser ışınları farklı dalga boylarında ortaya çıkmaktadır. Yaygın olarak kullanılan laser tiplerinin dalga boyları Şekil 2.7'de verilmektedir.

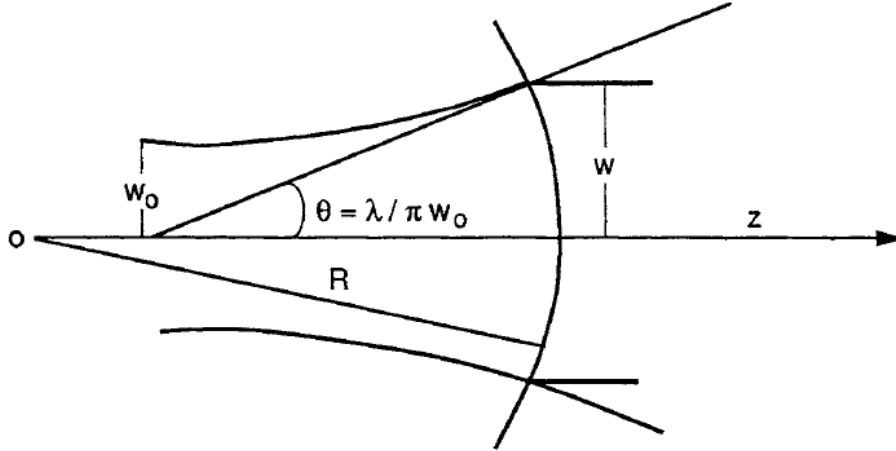


Şekil 2.7 : Yaygın olarak kullanılan laser türlerinin dalboyları ve bulundukları bölgeler.

- CO₂ laseri 10,6μm dalga boyunda kızılötesi bölgede çalışmaktadır.
- Neodyum glass laseri 1,06 μm dalga boyunda kızıl ötesi bölgede çalışmaktadır.
- Alüminyum – Galyum – Arsenit laseri kızıl ötesi bölgede 0,85 – 0,90 μm arasındaki dalga boyunda çalışmaktadır.
- Ruby laser görünür bölgede 0,6943 μm dalga boyunda çalışmaktadır. Görünür bölgenin kırmızı dalga boyu kısmındadır.
- Helyum – Neon laseri görünür bölgede bulunur ve 0,6328 μm dalga boyu sebebi ile turuncu renkte görülmektedir.
- Argon laseri ise görünür bölgede mavi ile yeşil renk bölgesinde çalışmaktadır.
- Kripton florid laseri ise morötesi bölgede bulunmaktadır ve dalga boyu 0,249μm'dir.

Laser ışınının bir başka önemli özelliği ise çok dar olan bant genişliğidir. Laser ışını; laser ışını elde edilme tekniğinden dolayı oldukça yüksek derecede demetlenmektedir. Normal lamba ışığının demetlendirilmesi için mercek ve aynalar gerekli iken laserde, elektromanyetik dalga sadece optik eksene paralel yönde

kuvvetlendirilerek paketlenmektedir. Çıkan ışın bu nedenle paraleldir. Buna karşın laser kaynağından uzaklaşması ile ıraksama eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu eğilim gaz laserleri için 1 kilometrede yaklaşık 10 santimetredir (Laser kaynağına göre farklılık göstermektedir). Şekil 2.8’de laser ışının ıraksaması şematize edilmiştir.



Şekil 2.8 : Laser ışınının ıraksama eğilimi hesaplanmasında kullanılan değerler [14].

$$Q = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad (2.2)$$

w_0 laser ışının yarıçapına eşit olduğundan;

$$Q = \frac{\lambda}{\pi \frac{D}{2}} = \frac{2\lambda}{\pi D} \quad (2.3)$$

[rad] olmaktadır.

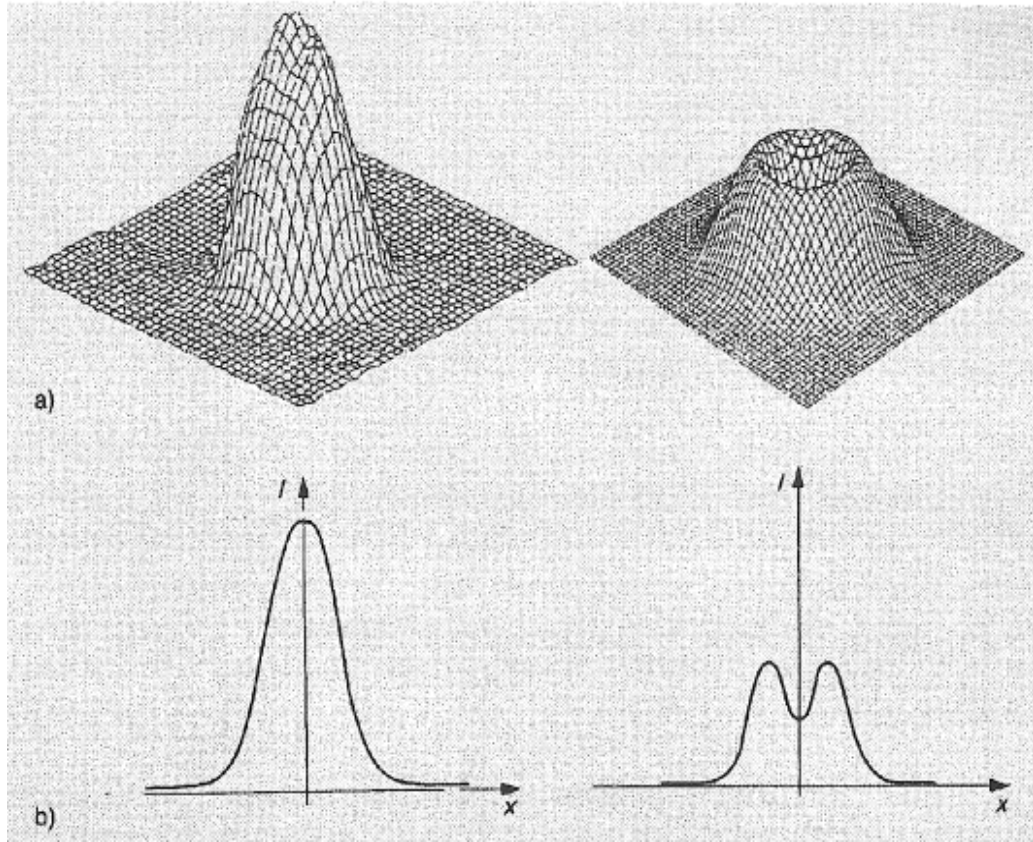
Bu formülü helyum-neon laseri için uygulayacak olursak; helyum – neon laserinin dalga boyu $0,63 \mu\text{m}$ ve Gaussian ışın profiline göre laser ışının oluşturduğu tüp üzerindeki geçirgen çap $0,15 \text{ cm}$, θ değeri 3×10^{-4} rad etmektedir. Bu da yaklaşık $0,02^\circ$ ‘ye karşılık gelmektedir. Bu durum laser ışınının paralelliğini ve dağılmadan ilerlemesini gösteren önemli bir örnek oluşturmaktadır. Çizelge 2.1’de yaygın olarak kullanılan laser türlerinin ıraksama açıları (2.3) formülü kullanılarak hesaplanmış ve verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Yaygın kullanılan laser türlerinin ıraksama açıları.

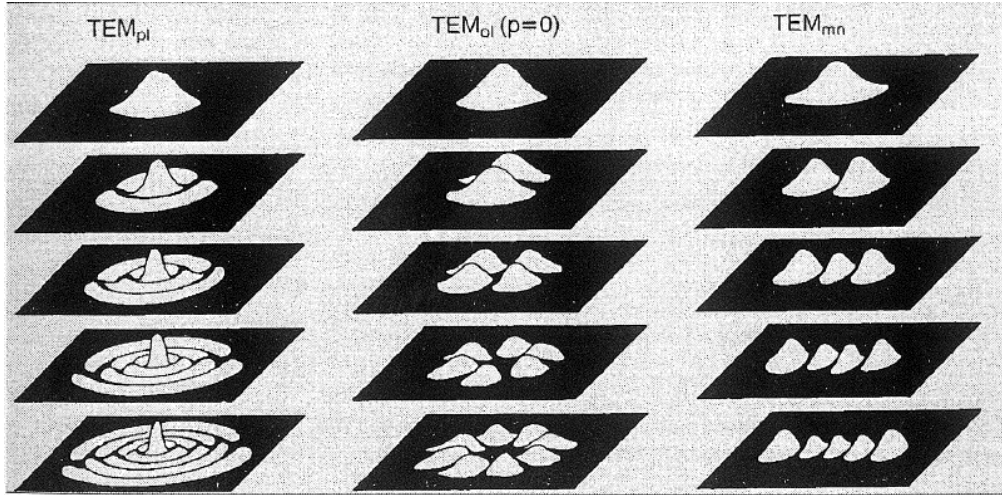
Laser Işını	He-Ne	Ar	CO ₂	Ruby	Nd:Glass	Nd:Yag	AlGaAs
Sapma (mrad)	0.5-1.0	0.5-1.0	1-5	1-5	0.5-10	1-10	20x200

Işın güç yoğunluğu, ışın kesiti üzerinde sabit değildir. Bu güç yoğunluğunun dağılımı TEM veya Mod olarak ifade edilir. Şekil 2.9 ve şekil 2.10'da gösterilen güç

yoğunluğu ve laser ışınındaki enerji dağılımı, laserin karakteristik özelliğini oluşturmaktadır. TEM özelliği uygulama alanlarının belirlenmesinde yardımcı olarak en verimli sistemin seçilmesini sağlar. Eğer enerji dağılımı noktasal ise, laser ışını kaynak, kesme, delme ve markalama gibi imalat işlemleri için uygundur. Eğer enerji dağılımı düzlemsel ise yüzey sertleştirme, lehimleme gibi ergitmeden ziyade büyük alanların ısıtması işleminin gerçekleştirilmesinin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 : Laser ışınının güç yoğunluğunun dağılımı.



Şekil 2.10 : Laser ışınının güç yoğunluğu dağılımı [15].

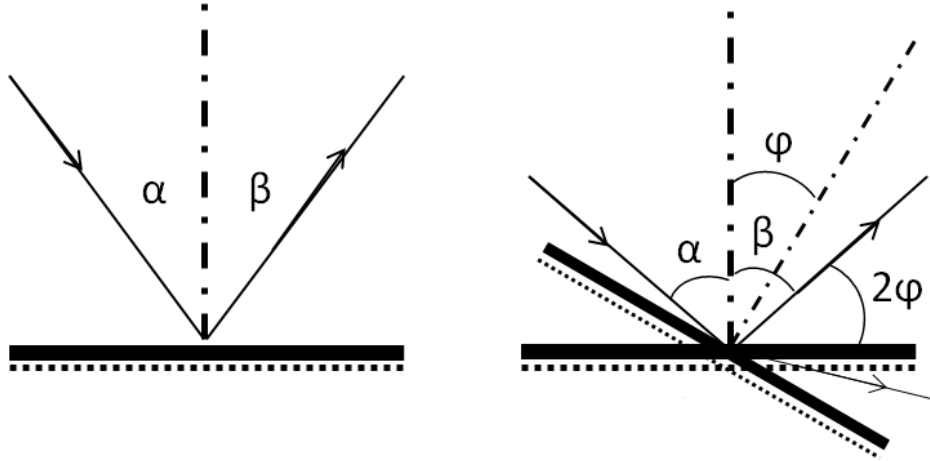
2.3 Optik Esaslar

Laser ışının oldukça küçük oranda ıraksama ve farklı enerji dağılımları gibi özellikleri ihmal edilirse, laser ışınının tam ideal olduğu kabul edilip; optik esaslar bu kabule göre değerlendirilmektedir.

Laser ışınının imalat yöntemi olarak veya diğer sektörlerde kullanılabilmesi için; ışının elde edildiği tüpün içerisinde işlemin yapılacağı yere taşınması ve istenilen noktaya odaklanması gerekmektedir. Bu sebeple optik esaslar laser teknolojisinin ayrılmaz bir parçasını oluşturmaktadır.

2.3.1 Işığın yansıması

Düzlemsel bir aynada ışığın ve laser ışınının yansıması (refleksiyon) ile yüzeye gelen yüzeyden yansıyan ışık ile tarif edilmektedir. Gelme açısı α ve yansıma açısı β eşit büyüklüklere sahip değerlerdir. Laser ışınının farklı gelme açılarının oluşturulması için, döndürülebilir aynalar kullanılmaktadır. Ayna ϕ açısı kadar döndürüldüğünde, laser ışını bu değer iki katı bir değer ile daha farklı bir yönde 2ϕ şeklinde devrilir. Ayna açısının değiştirilmesinin yansıyan ışın açısına olan etkisi şekil 2.11’de gösterilmektedir. Aynanın küçük açı değişimleri ile göreceli olarak laser ışınının yönü büyük oranda değişmektedir. Yansıma esnasında ise laser ışınının şekli ve paralelliği herhangi bir değişiklik oluşturmamaktadır.

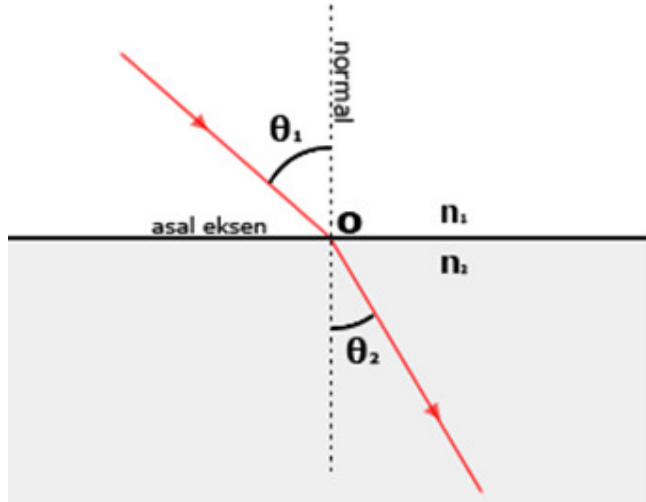


Şekil 2.11 : Aynanın açısal değişiminin gelen ve yansıyan ışın açısına olan etkisi.

Kullanılan aynaların yüzeyleri tamamen eş dağılımlı (homojen) ve yüksek yansıtma özelliğine sahiptir. Yüksek değerlikli aynaların yaklaşık %99,5 değerine kadar yansıtma özellikleri vardır. Böylesine yüksek dereceli aynaların kullanımı, silisyum kaplanmış bakır ve wolfram aynalar ile sağlanabilmektedir. Yüksek enerji dağılımlı (güç yoğunluklu) laser ışınlarında tercih edilen metal aynalar, yüksek ısı iletkenliklerinin getirdiği avantajlardan faydalanılarak su soğutma sistemi ile soğutulabilmektedir. Çünkü aynaların yüksek yansıtma özelliklerine rağmen bir miktar enerjisi soğurmakta ve bu da metal ayna yüzeyinin ısınmasına sebep olmaktadır. Silisyum ısı dayanımı göreceli düşük güç yoğunluğu değerinde olup, yaklaşık 10^3 W/cm^2 'dir. Laser ışınının odaklanması için küresel veya parabolik aynalar kullanılmaktadır. Paralel olarak optik eksene gelen ışınlar aynanın odak noktasında toplanır. Bu odak noktasında laser ışının güç yoğunluğu öncesine göre daha da yükselmektedir. Küresel aynalarla ışınlar, odak noktasında yakınsak olarak toplanabilmektedirler. İraksak odak noktası için ise parabolik aynalar kullanılmaktadır.

2.3.2 Işığın kırılması

Işık, n_1 kırılma indisine sahip optik bir ortamdan, n_2 kırılma indisine sahip başka bir optik ortama geçerken kendi doğrultusunu değiştirerek yönünden sapar. Böylesi bir durum laser ışını için de geçerlidir. Şekil 2.12 Kırılmaya ait kanun aşağıdaki formül ile verilmektedir.



Şekil 2.12 : Ortam değiştiren ışığın kırılması ve yaptığı açılar.

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

Bir ortamdaki diğer bir ortama geçerken yaptığı kırılma açısının ortam indisine bağlı olarak değişimi (2.4) formülü ile hesaplanmaktadır.

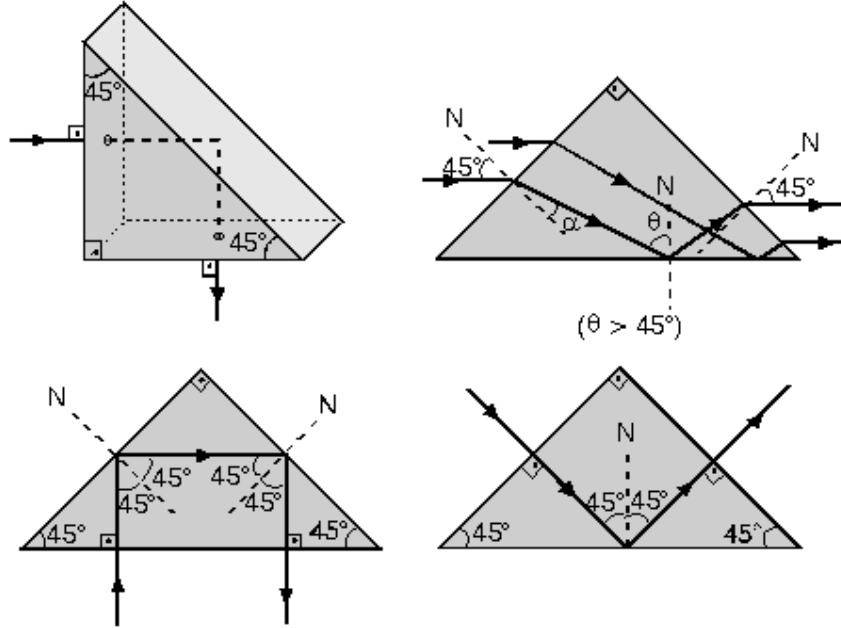
Işık, zayıf optik ortamdan yoğun optik ortama gönderildiğinde normale yaklaşarak kırılır. Buna karşın ışığın yoğun optik ortamdan zayıf ortama gönderilmesi durumunda ise normalden uzaklaşarak kırılması durumu söz konusudur.

Kırılma olayı gerçekleşirken laser ışınının güç yoğunluğunun bir kısmı yitilir. Bunun sebebi ise sınır yüzeyde bir miktar yansımaların olmasıdır. Sınır tabaka üzerinde gerçekleşen yansıma miktarı kırılma indisiyle doğrudan ilişkilidir.

2.3.3 Prizmalar

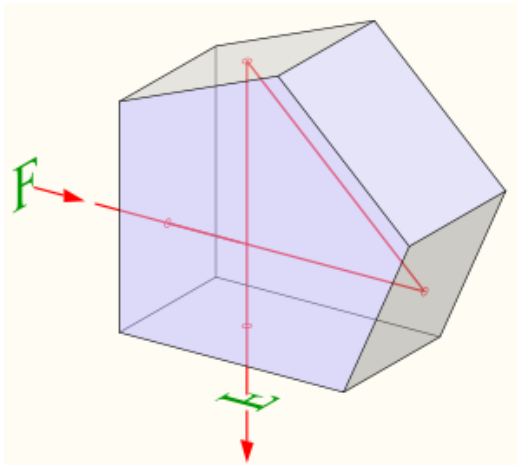
Laser ışınının doğrultularının değiştirilmesi için prizmalara oldukça sık başvurulmaktadır. Laser ışınının doğrultusunun 90° 'lik bir açı ile döndürülebilmesi için eşkenar ve dik açılı prizmalar kullanılmaktadır. Yansıma kuralına göre ışın prizmada tam yansıma ile kırılmaktadır. (Prizma yüzeyinde sınır tabaka üzerinde gerçekleşen yansıma miktarı ihmal edilebilir düzeydedir.) Yansıma esnasındaki; laser ışınının güç yoğunluğunun yitilmesini en aza indirmek için prizmaların dik kenarları ayna parlaklığında hazırlanmaktadır. Benzer bir şekilde ışının doğrultusunu 180° 'lik bir açı ile değiştirmek için eşkenar ve dik açılı prizmalardan faydalanılır.

Şekil 2.13'te prizmanın farklı yüzeylerine farklı açılar ile giren ışınların, çıkış yüzeyleri ve açıları verilmiştir.



Şekil 2.13 : Dik prizmanın farklı yüzeylerine farklı açılar ile giren ışınların, çıkış yüzeyleri ve açıları [16].

Beşgen prizma kullanıldığı durumlarda ise laser ışını her zaman 90°'lik bir açı ile kırılmaktadır. Bu prizmanın sağladığı en önemli avantaj ise ayar yapma ihtiyacını ortadan kaldırmasıdır. Şekil 2.14'te beşgen prizmaya gelen ışığın prizma içerisinde izlediği rota ve çıkışı verilmiştir.



Şekil 2.14 : Dik prizmanın farklı yüzeylerine farklı açılar ile giren ışınların, çıkış yüzeyleri ve açıları [17].

2.4 Laser Işınının Malzeme İle Etkileşimi

Laser ışınının odaklanabilme, sabit dalga boyu ve dağılmadan oldukça uzun mesafelerde yol alabiliyor olması kendisine ısıtma, ergitme ve buharlaştırma gibi birçok uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Kaynak torçunda olduğu gibi alışıla gelmiş ısı kaynakları güç yoğunluklarını yeterince dar alanlara laser kadar iyi odaklanamazlar. Küçük bir punta veya kaynak işlemi için büyük güçlere ihtiyaç yoktur. Önemli olan bu gücün ne kadar dar alanda yoğunlaştırılabildiğidir. 200W'lık bir ısı kaynağı metali ergitmeye yetmezken; 200 W'lık bir laser metali ergitmek için yeterli olabilmektedir.

Laser ışını hedeflenen yüzeye tesir ettiğinde; gönderilen laser ışınının bir kısmı yüzey tarafından tutulurken (soğurulurken) , bir kısmı ise yüzeyden yansımaktadır. Yüzeyde soğurulan ışın yüzeyi ısıtmaya başlamaktadır. Yansıyan kısım ise kayıp olarak değerlendirilmektedir.

Laser ışını yüzeye etki ettiğinde, yüzeyde ısı etkisi oldukça kısa sürede ortaya çıkar. Gönderilen ışın gücünün birim alanda soğurulan miktarı, ısı kaybından daha büyük olduğunda, malzeme yüzeyindeki ısınma devam etmektedir. Bu durumda yüzey sıcaklığı hızlı bir şekilde ergime sıcaklığına ulaşır. Malzemenin ergimesi; malzeme içerisinde ısının akışı ile doğrudan orantılıdır. Isının malzeme içerisindeki akışı “K” ısıl iletim katsayısı ile tanımlansa da ısıl iletim katsayısı bu durumu açıklamak için tek başına yeterli olmamaktadır. Malzeme sıcaklığında ki değişim oranı için “c” malzeme spesifik ısı da dikkate alınmalıdır. Aslında ısınma oranı hacim başına düşen spesifik ısı ile ters orantılıdır. Bu değer in hesaplanması için yoğunluk ile spesifik ısının çarpılması yeterli olmaktadır.

Malzeme içerisindeki ısı akışı için önemli olan faktör (2.5) formülüyle hesaplanıp karakteristik difüzyon katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Karakteristik difüzyon katsayısının birimi cm^2/s 'dir.

$$\frac{K}{dc} \quad (2.5)$$

Karakteristik difüzyon katsayısı, darbeli laser kaynağı gibi birçok zamana göre değişkenlik gösteren ısı akışı prosesi için kullanılabilir. Bu katsayı gönderilen ısıl enerjinin ne kadar hızlı alınacağını ve iletileceğini göstermektedir. Örneğin, laser kaynağında yüksek ısıl iletim katsayısı daha fazla nüfuziyet derinliğine termal şok

veya kırılma olmadan ulaşılmasını sağlamaktadır. Çizelge 2.2’de bazı malzemelerin termal yayınımları verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin termal yayınımları.

Metal	Isıl Difüzyon (cm ² /s)	Isıl Zaman Sabiti (ms)			
		0.01cm kalınlık	0.02cm kalınlık	0.05cm kalınlık	0.1cm kalınlık
Gümüş	1.7	0.015	0.059	0.368	1.47
Alüminyum Alaşımları					
-Ticari Saf	0.850	0.029	0.118	0.74	2.94
-2024 Alaşımı	0.706	0.035	0.142	0.89	3.54
Bakır Alaşımları					
-Elektrilitik(%99.95)	1.14	0.022	0.088	0.55	2.19
-Pirinç	0.378	0.066	0.265	1.65	6.61
-Fosfor bronz	0.213	0.117	0.470	2.93	11.74
Demir Alaşımları					
-Ticari Saf	0.202	0.124	0.495	3.09	12.38
-303 Paslanmaz Çelik	0.506	0.446	1.786	11.16	44.64
-Karbon Çeliği	0.119	0.210	0.840	5.25	21.01
Nikel Alaşımları					
-Ticari Saf	0.220	0.114	0.495	2.84	11.36
-Monel (max %67 Ni)	0.055	0.455	1.818	11.36	45.46
-Inconel (%77 Ni)	0.039	0.641	2.564	16.03	64.10

Paslanmaz çelik ve bazı nikel alaşımlarında ısı difüzyon katsayısı düşük değerlere sahiptir. Isıl difüzyon katsayısının düşük olması, malzeme içerisindeki ısı nüfuziyet miktarını azaltacağından kaynak edilebilirlik özelliğini düşürmektedir.

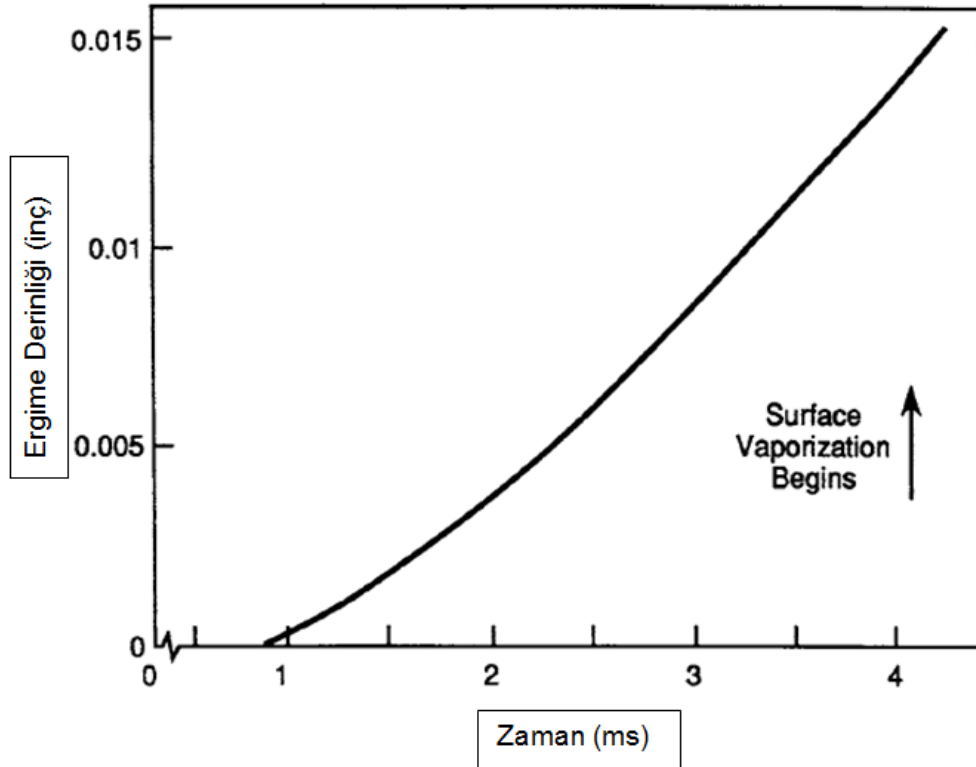
“t” zamanı içerisinde ısının nüfuziyet derinliği miktarı (2.6) numaralı formül ile açıklanmaktadır.

$$D = (4kt)^{1/2} \quad (2.6)$$

Çizelge 2.2’de veriler ışığında ısı difüzyon katsayısının düşük olduğu durumlarda malzeme içerisine ısı nüfuziyet derinliği iyi bir şekilde sağlanamamaktadır. Isıl Difüzyon katsayısının yüksek olduğu durumlarda da bazı problemler ile karşılaşmaktadır. Bu gibi durumlarda ısı yüzeylerden hızlı bir şekilde atılır ve bu da ergime miktarını azaltmaktadır. Bu etkiyi azaltabilmek için laserin diğer parametrelerini değiştirip iyi bir nüfuziyet derinliğine ulaşmak mümkün olabilmektedir. Örneğin bakır gibi yüksek ısı difüzyon katsayısına sahip parçaların kaynağı için daha yüksek laser gücü ve daha kısa darbe süresi kullanılarak bu etki ile başa çıkmak mümkün olmaktadır. Paslanmaz çeliğin kaynağında ise daha düşük güç

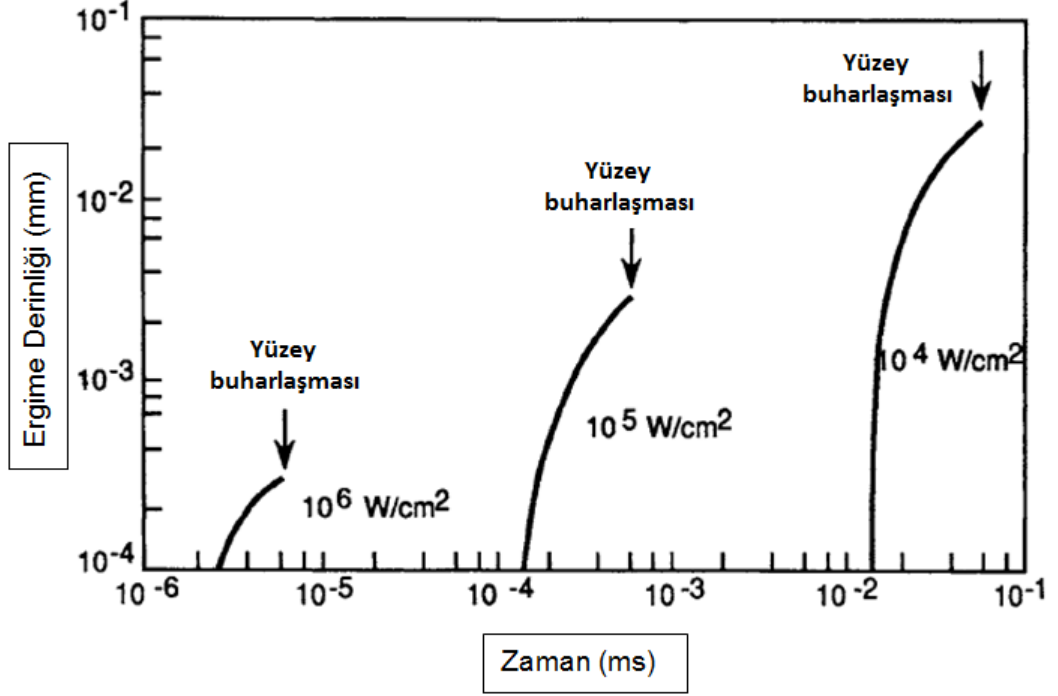
ve daha uzun darbe süreleri ile (bakıra göre) iyi bir nüfuziyet derinliği elde edilebilmektedir.

Laser ışını ile etkin bir ergitme ve kaynak yapma zamana, darbe kontrolüne ve işlem esnasında yüzeyden buharlaşma olmamasına bağlıdır. Şekil 2.15’de 10^5 W/cm^2 güç yoğunluğunu soğuran nikel bir parçaya ait ergime derinliğinin zamana göre değişimi verilmiştir.



Şekil 2.15 : Nikel bir parçanın 10^5 W/cm^2 güç yoğunluğundaki laser ışınına maruz kaldığı durumda ergime derinliğinin değişim grafiği [18].

Şekil 2.15’te de görüldüğü üzere 4ms civarından sonraki darbelerde yüzeyden buharlaşma başlamaktadır. Daha büyük nüfuziyet derinliğine ulaşmak için ise diğer laser parametrelerinin değiştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum genellikle güç yoğunluğunun azaltılması ve darbe süresinin uzatılması ile çözülebilmektedir. Ancak bu durumda kontrolün daha hassas bir şekilde yapılması kaçınılmazdır. Şekil 2.16’da farklı güç yoğunluklarına sahip laser ışınının zamana bağlı nüfuziyet derinliğinin değişimi verilmiştir.



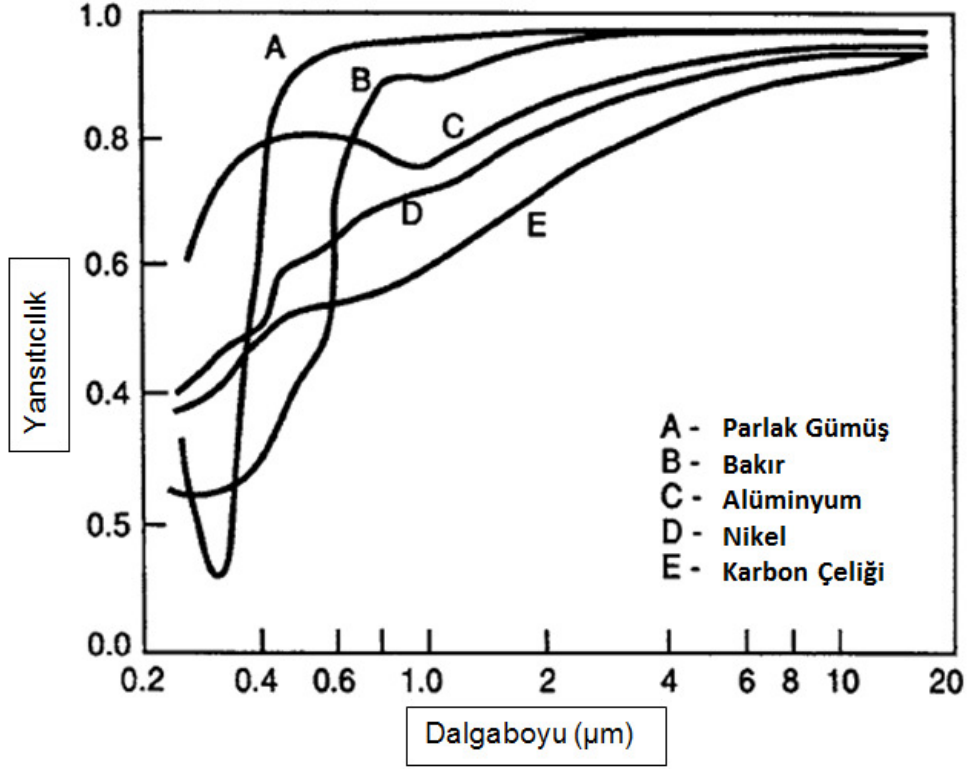
Şekil 2.16 : Farklı güç yoğunlukları için zamana bağlı ergime derinliği grafiği [19].

Nüfuziyet derinliği problemi her ne kadar parametrelerin değiştirilmesi ile kontrol edilebilse de bu durum oldukça limitli kalmaktadır. Bu durumun çözülebilmesi için yüksek güçlü laserler kullanılmaktadır. Öncelikle bir delik açılıp ardından deliğin içi ergimiş malzeme ile doldurularak 20mm kalınlığındaki sac parçalar bile birbirine kolaylıkla kaynatılabilmektedir.

Laser ışınının etkin bir şekilde kullanılmasını etkileyen bir diğer parametre ise parça yüzeyinin yansıtıcılığıdır. Parça yüzeyinin gelen ışını yansıtma oranı ne kadar gücün kayıp, ne kadar gücün faydalı olacağını belirlemektedir. Yansıtma katsayısı boyutsuz bir sayı olup “1” ile “0” arasında değişmektedir.

Şekil 2.17’de de görüldüğü üzere farklı malzemeler, farklı dalga boylarındaki laser ışınlarını farklı miktarlarda yansıtmaktadır. Yansıtma katsayısı yüzey kalitesi ve oksidasyon miktarı gibi birçok koşulun fonksiyonu olarak değişmektedir.

Şekil 2.17 incelendiğinde bazı önemli noktalar görülmektedir. Örneğin bakır malzemeler görünür dalga boyunun mavi kısmında düşük yansıtma katsayısına sahipken, bu değer görünür dalga boyunun kırmızı kısmında nispeten daha yüksektir. Bu durum bakırın rengi ile açıklanmaktadır.



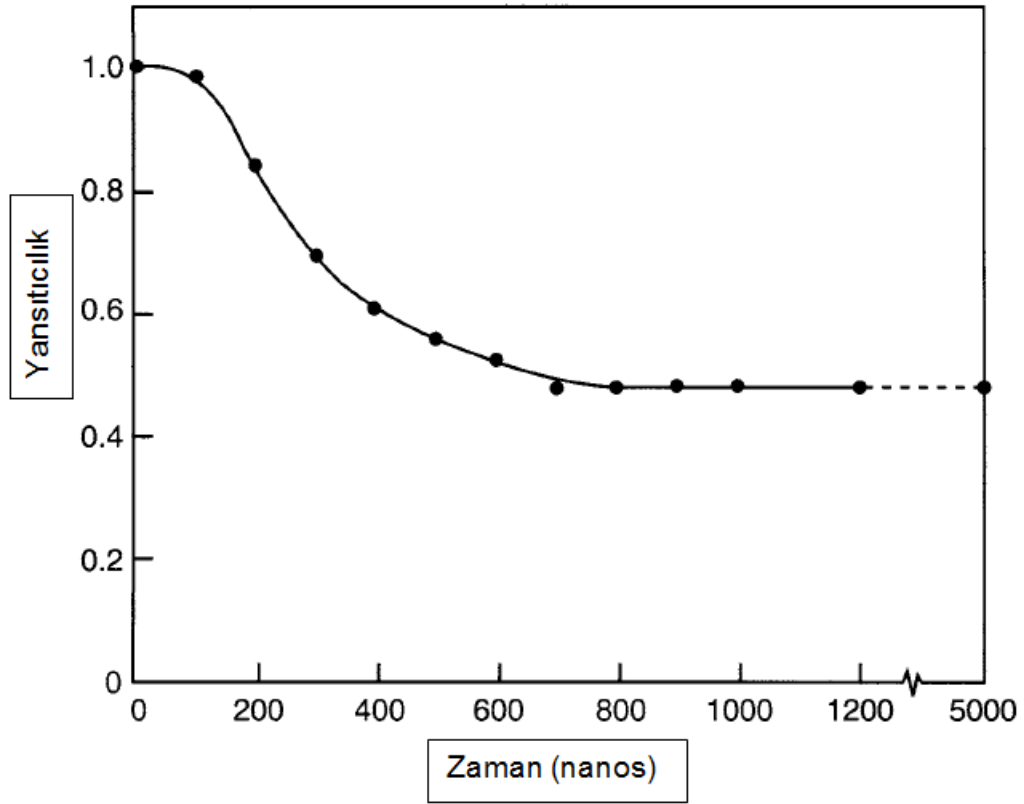
Şekil 2.17 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin laser dalga boylarına göre yansıtıcılık özellikleri grafiği [20].

Şekil 2.17’de verilen tüm malzemelerin yansıtma katsayısı kızılötesi dalga boyuna sahip bölgede yüksektir. Dalga boyunun 5 μm ’yi geçtiği durumlarda yansıtma katsayısı elektrik iletkenlik katsayısına bağlıdır. Yüksek elektrik iletkenlik katsayısına sahip malzemeler kızılötesi bölgede en yüksek yansıtma katsayılarına ulaşmaktadır.

R yansıtma katsayısı ise, malzeme yüzeyinde soğurulan laser ışını miktarı $1-R$ ile tanımlanır. CO_2 laserleri için, laser ışınının dalga boyu 10,6 μm olup R değeri 1’e çok yakındır. Bunun anlamı gönderilen laser ışınının çok büyük kısmı yüzey tarafından yansıtılırken, çok küçük bir kısmının soğurulup parçanın ısınmasında kullanılacağıdır. Bu durumda yansıtma katsayısı büyük dalga boylarında önem kazanmaktadır. Bakır ve gümüş için 10,6 μm dalga boyunda soğurma katsayısı $(1-R)$ değeri 0,02 olmaktadır. Aynı durumda çelik için ise bu değer 0,05 olmaktadır. Çeliğin soğurma katsayısı bakır ve gümüşe göre 2,5 kat daha fazla olduğundan diğerlerine göre kolay kaynak edilebilmekte veya kesilebilmektedir.

Laser ışınının dalga boyu varyasyonu da bu durumda önem kazanmaktadır. Düşük dalga boylarında soğurma katsayısı daha yüksek değerler almaktadır. Örneğin çelik için 1-R değeri $1,06\ \mu\text{m}$ için 0,35 iken, $10,6\ \mu\text{m}$ 'de 0,05 olmaktadır. Bunun anlamı Nd:YAG laser ışını çelik malzeme yüzeyinde CO₂ laserine göre 7 kat daha fazla soğurulmaktadır.

Ancak diğer etmenler yüksek dalga boyuna sahip laser ışınının verimliliğini arttırmaktadır. Şekil 2.18'de de görüldüğü üzere laser ışınının yüzeye tesiri esnasında yüksek yansıtma katsayısı değeri hızla düşmektedir. Bu durumda başlangıç yansıtma katsayısı değil, ortalama yansıtma katsayısı dikkate alınmalıdır.



Şekil 2.18 : Malzemenin zaman bağlı olarak laser ışını yansıtma oranının değişim grafiği [21].

Laser ışını ile delik delme esnasında darbe süresine bağlı olarak yüzey hızlı bir şekilde ısınır. Normal darbe laserlerinde (darbe süresi 1 ms) malzeme ile laser ışınının etkileşimi esnasında ergime ve ardından buharlaşma başlar. Buharlaşmanın başlaması için geçen süre (2.7) formülü ile hesaplabilmektedir.

$$t_B = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K d c}{F^2} \cdot (T_B - T_0)^2 \quad (2.7)$$

Formülde verilen t_B , buharlaşmanın başlaması için geçen süre, K ısı iletim katsayısı, g yoğunluk, c malzemenin ısı ı kapasitesi, T_B buharlaşma sıcaklığı, T_0 ortam sıcaklığı ve F soğurulan laser ışını güç yoğunluğudur.

Çizelge 2.3 : Güç yoğunluğuna bağı ı olarak yaygın kullanılan bazı malzemelerin buharlaşmaya başması için geçen süreler.

Metal	Soğurulan Laser Işını (W/cm ²)		
	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Kurşun	118 μs	1.18 μs	12 ns
Çinko	128 μs	1.28 μs	13 ns
Manganezyum	245 μs	2.45 μs	24.5 ns
Titanyum	319 μs	3.19 μs	31.9 ns
Krom	1.54 ms	15.4 μs	154 ns
Nikel	1.84 ms	18.4 μs	184 ns
Demir	1.86 ms	18.6 μs	186 ns
Alüminyum	3.67 ms	36.7 μs	367 ns
Molibden	5.56 ms	55.6 μs	556 ns
Bakır	8.26 ms	82.6 μs	826 ns
Tungsten	10.46 ms	104.6 μs	1046 ns

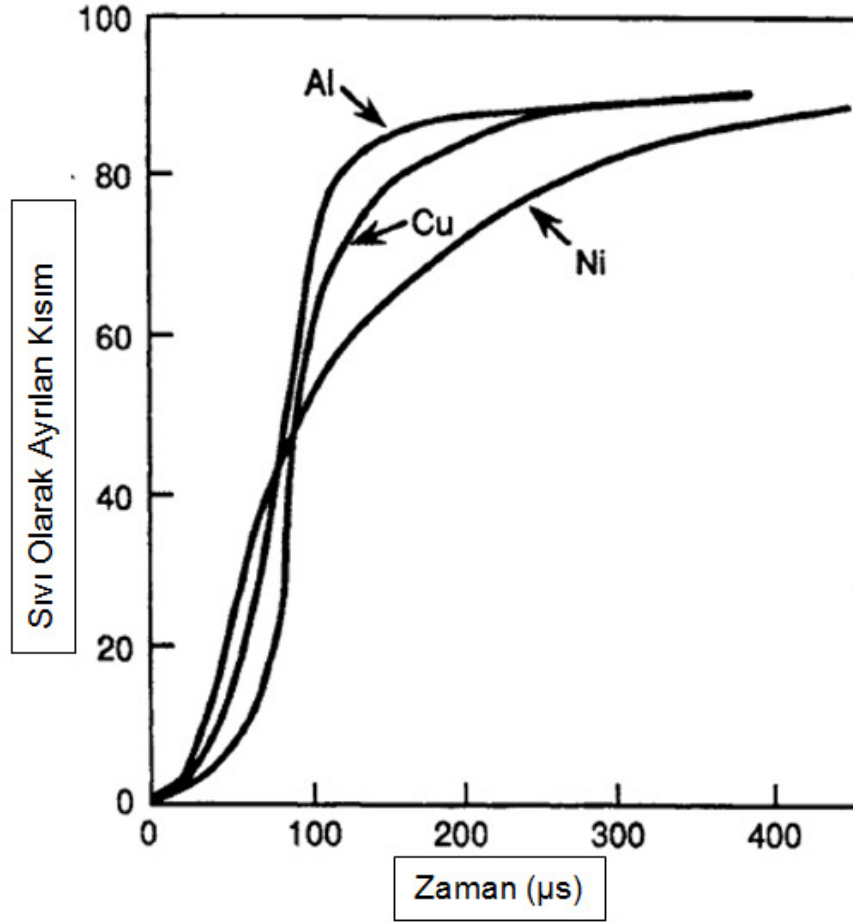
Çizelge 2.3'te görüldüğü üzere (2.7) nolu formül kullanılarak bazı malzemelerin farklı güç yoğunlukları için hesaplamalar yapılmıştır. Buradan çıkarılacak sonuç güç yoğunluğunun artması durumunda, buharlaşma süresinin kısılmasıdır. Delme işlemi esnasında boşaltılan malzemenin tamamı buharlaşma yoluyla ortamdan uzaklaştırılmayıp, bir bölümü de sıvı olarak deliğı terk etmektedir. Bu durum işlemi kolaylaştırmakta ve daha hızlı bir şekilde deliğın açılmasına imkan sağlamaktadır.

Şekil 2.19'da da görüldüğü üzere başlangıçta yüzeyden ayrılan malzemenin tamamına yakını buhar fazındayken, ardından birkaç 100 μs sonra yüzeyden ayrılan malzemenin %90'nına yakını sıvı fazda bulunmaktadır.

Yüksek güçlü laser ışınları yüzeye nüfuz ettiğinde (laser gücü arttıkça yüzeyden buhar fazında ayrılan malzeme miktarı artmaktadır. Buharlaşan metal yüzey üzerinde termal olarak iyonize olduktan sonra, gelen laser ışınının bir bölümününü soğurarak, ışınların tamamının malzeme yüzeyine ulaşmasını engellemektedir.. Bu da yüzey tarafından soğurulacak olan laser ışınının miktarını azaltmaktadır. Oluşan iyon tabakası bir tür kılıf görevi görmektedir.

Darbe ilk gönderilmeye başlandığında yüzeyde buharlaşma başlar ve buharlaşan metal laser ışını tarafından ısıtılarak iyonlarına ayrılır. Bu durumda sıcak, opak bir

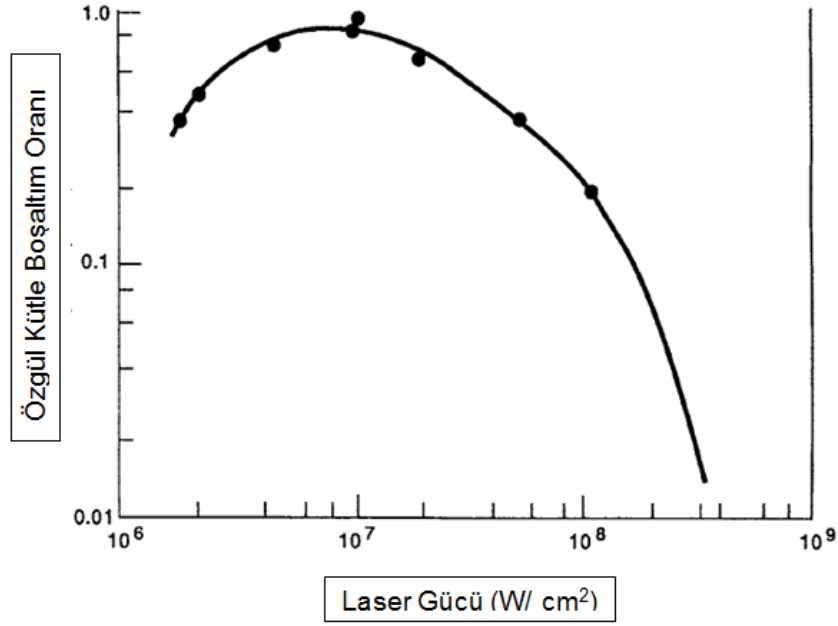
iyonize plazma ortamı oluşur. Bu plazma gönderilen laser ışınının tamamına yakınıni soğurmaktadır. Darbe'nin devam etmesi durumunda plazma genişlemekte ve tekrardan transparan hal almaktadır. Bundan sonra ise laser ışını tekrar yüzeye ulaşmakta ve malzeme buharlaştırmaya devam etmektedir. Oluşan opak, iyonize plazma kalkanına “laser kaynaklı sönümleme” (laser-suppoerted absorption -LSA) dalgası denilmektedir.



Şekil 2.19 : Alüminyum, bakır ve nikel'in zamana bağlı olarak ergime yüzdesi [22].

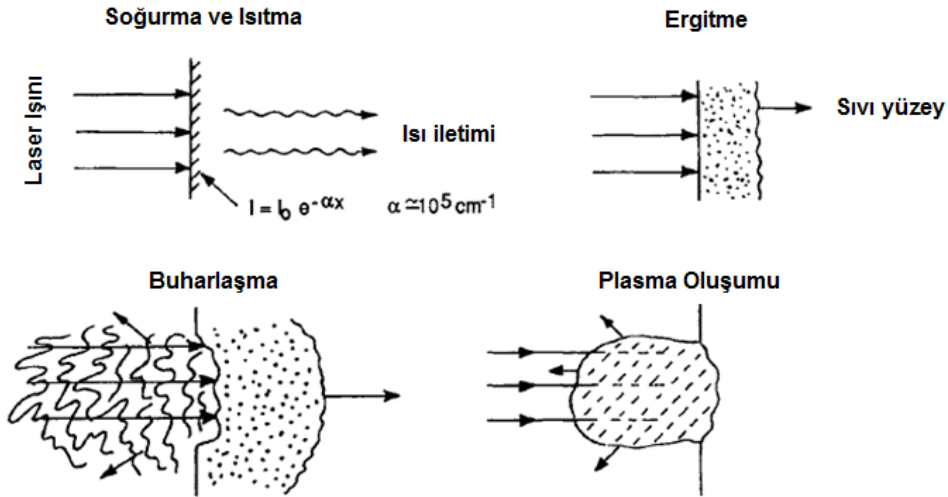
LSA dalgasının malzeme yüzeyinde oluşturduğu kalkanın etkisi 1ms'lik darbeye sahip CO₂ laseri için şekil 2.20'de gösterilmektedir.

Şekil 2.20'de tanımlanan “Özgül Kütle Boşantım Oranı” her bir birim laser enerjisinin uzaklaştırdığı malzeme miktarını göstermektedir. Bu aslında malzeme boşaltma mekanizmasının verimini gösteren bir terimdir. Laser ışınının güç yoğunluğu 10^7 W/cm^2 'den yüksek değerlerde ise LSA oluşmakta ve malzeme üzerinde oluşan kalkan sebebiyle verimlilik azalmaktadır.



Şekil 2.20 : Laser gücüne bağlı olarak plasma oluşumunun kütle boşaltmaya olan etkisi [23].

Laser ışınının malzeme üzerindeki etkisi şekil 2.21’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.21 : Laser kesimde plasma oluşum aşamaları [24].

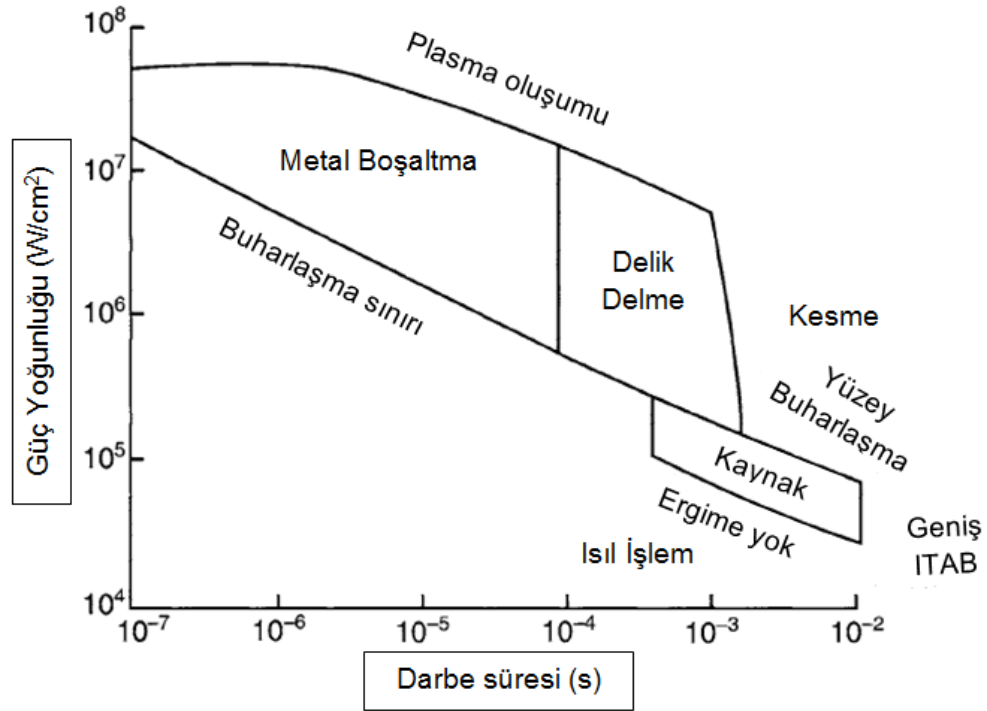
Şekil 2.21’de gösterilen soğurma ve ısınma kısmında geçerli olan eksponansiyel soğurma yasası (2.8) formülü ile verilmiştir.

$$I_{(x)} = I_0 e^{-kx} \quad (2.8)$$

Denklemden verilen $I_{(x)}$ x derinliğindeki ışın yoğunluğu; I_0 başlangıçtaki ışın yoğunluğu; α soğurma katsayısıdır. (Metaller için k değeri 10^5 cm^{-1} mertebesinde dir.)

LSA dalgası laser ışınının malzemeye olan etkisini azalttığından istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Zaten sanayi uygulamalarında güç yoğunluğu 10^7 - 10^8 W/cm²'yi geçmediğinden çok karşılaşılan bir durum değildir. Bu durumdan sanayide sadece alüminyum malzemelerin yorulma kırılması direncini arttırmakta kullanılan şok dalgası ile sertleştirme metodunda faydalanılmaktadır. Çünkü plasma ortamı oluşup sona ererken sürekli şok dalgaları oluşturmaktadır.

Şekil 2.22'de laser ışını güç yoğunluğu ve darbe sürelerine bağlı olarak uygulanan yöntemler verilmektedir.



Şekil 2.22 : Güç yoğunluğu ve darbe süresine bağlı olarak seçilecek imalat yöntemi [25].

3. LASER TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMA ALANLARI

3.1 Giriş

Laser teknolojisi sahip olduğu avantajlar sebebi ile sanayide birçok alanda kendisine uygulama alanları bulmuştur. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir.

- Kesme
- Delme
- Kaynak
- Lehimleme
- Sertleştirme/Isıl işlem
- Ölçme
- Savunma sanayi

Alışıla gelmiş imalat yöntemlerinin, gelişen malzeme teknolojiye cevap verememesi veya pahalı oluşu laser teknolojisinin kullanılmasını teşvik etmektedir. Özellikle üretim miktarlarının kısmen düşük ve çeşitliliğin yüksek olduğu ortamlarda laser teknolojisi uygun olup, diğer yöntemlerin önüne geçmektedir. Kesme, delme gibi işlemlerde kalıp yatırımı ihtiyacını ortadan kaldırdığı gibi yüksek hız ve hassasiyet imkanı bu teknolojinin tercih edilmesini sağlamaktadır.

Laser teknolojisi bir diğer geniş kullanıma sahip olduğu kaynak yönteminde de uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle çarpılmanın az olması istenen parçalarda laser teknolojisi önemli artılar getirmektedir. Kaynak işlemi esnasında “Isı Tesiri Altındaki Bölge” laser sayesinde oldukça dar olduğundan gerilmelerde bir o kadar düşük olmaktadır. Ayrıca laser dar/derin kaynakların yapılmasına da imkan vermektedir.

Laser teknolojisi; geleneksel yöntemlere göre daha kaliteli yüzey, daha hızlı bir işlem, daha dar toleransların gerektiği ısıl işlem yapılacak parçalarda da

uygulanmaktadır. Bu tür uygulamalara askeri, havacılık ve uzay araçlarına ait bazı parçalarda başvurulmaktadır.

Laser ışınının dağılmadan uzun mesafeler kat edebilme özelliğinden dolayı ölçme sistemi olarak da kullanılmasına olanak sağlamıştır. Laser ışınının nesneye çarpıp cihaza geri gelene kadar geçen süre hesaplanıp ışının aldığı yol kolaylıkla ölçülebilmektedir. Günümüzde başta inşaat olmak üzere birçok alanda yaygın olarak laser ölçüm aletleri kullanılmaktadır.

Günümüz savunma sanayinde gerek mühimmat ihtiyacının azaltılması, gerekse düşman birliklere daha etkin hasarların verilmesi amacıyla laser teknolojisi üzerine oldukça fazla çalışma yapılmaktadır. Yüksek güçlü laser ışını kilometrelerce uzaklıktaki düşman aracına veya füzesine odaklanarak harici mühimmat gereksinimi olmaksızın etkisiz hale getirebilmektedir.

3.2 Laser Kaynağı

Laser teknolojisi ilk geliştirilmeye başlandığında özellikle kaynak teknolojisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bunun sebebi laserin malzeme ile etkileşimi esnasında oldukça sınırlı ve dar bir ısı tesiri altında bölge oluşumudur. 1960'lı yılların sonlarına doğru bazı punta kaynak uygulamaları için Ruby laseri kullanılmaya başlanmıştır. 1970'li yıllarda CO₂ ve Nd:YAG laser sistemleri üzerinde yapılan geliştirmeler, laser kaynak yönteminin yaygınlaşmaya başlamasındaki ilk adımları oluşturmaktadır. Bu laser türlerindeki geliştirmeler sayesinde, punta kaynak metodunun yanında dikiş kaynak metodu da uygulanabilir olmuştur. 1971 yılında 1 kW'ın üzerindeki CO₂ laser ile derin nüfuziyet miktarı sağlanmıştır. 1970'li yılların ortalarına gelindiğinde ise laser kaynağı, kaynak yöntemleri arasında yerini almış ve önemli ölçüde uygulama alanlarına sahip olmuştur. Laser kaynak yönteminin hızlı bir şekilde yaygınlaşmasının sebebi sağladığı teknik avantajların yanında birçok kaynak yöntemine göre daha ekonomik olmasıdır.

Laser kaynağı uygulanmalarında sonuç; laser ışınının parametreleri; özellikler ve kaynak yapılacak parçanın özelliklerine doğrudan bağlıdır. Parçanın ısı difüzyon katsayısı en önemli parametrelerden biridir. Yüksek ısı difüzyon, ısıнын parça içerisinde daha hızlı yayılmasını ve daha derin kaynak nüfuziyeti sağlamaktadır. Parça ile ilgili bir diğer önemli parametre yüzeyde laser ışınının soğurulma

miktardır. Yüksek yansıtma özelliğine sahip parçaların kaynağı için diğer malzemelere oranla daha fazla enerji harcanmasına ihtiyaç vardır. Yansıtma özelliği ışının dalga boyu ile doğrudan ilişkili olduğundan kaynak için malzemeye uygun laser tipleri de seçilebilmektedir. Parlak yüzeyler yansıtma özelliğini arttırdığından yüzeylerin mat malzemeler ile kaplanması bazı uygulamalarda olumlu sonuçlar vermektedir. Ayrıca parlatılmış (hassas taşlanmış) yüzeyler nüfuziyet derinliğini olumsuz etkilediğinden, yüzeylerin parlaklığı kaynak işlemi öncesinde azaltılabilmektedir.

Laser kaynak yöntemini etkileyen ve optimum değerlerin olması gereken özellikler aşağıdaki gibidir;

- Laserlerin dalga boyu malzeme tarafından iyi soğurulmalı
- Laser güç yoğunluğu malzemeyi ergitecek kadar yüksek olmalı
- Darbeli laserlerde, darbe süresi ısıнын parça içerisinde ilerlemesine yetecek kadar uzun olmalı
- Darbe süresi ve güç yoğunluğu yüzeyden buharlaşmaya sebep olmayacak şekilde optimum değerlere ayarlanmalıdır.

Başarılı bir laser kaynağının tahmini için önem arz eden parametreler aşağıdaki gibidir:

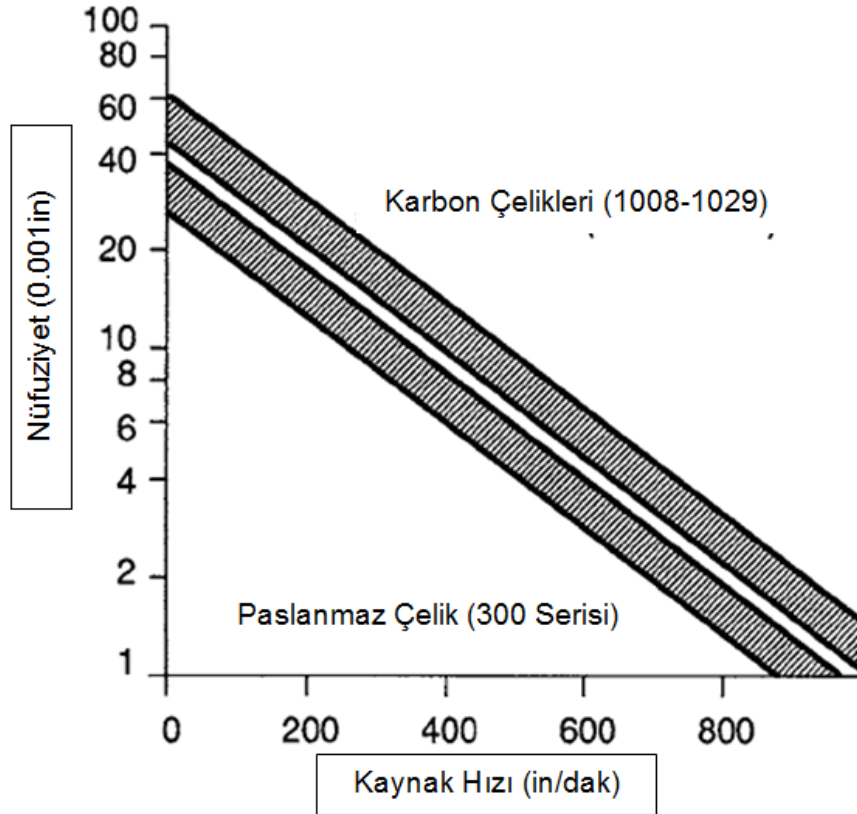
- Laser uygulamasının ekonomik analizi
- Laser türünün seçimi
- Optimum proses parametrelerinin seçimi (darbe süresi; güç yoğunluğu; odak mesafesi v.b.)
- Parça fikstürünün tasarımı
- Parça üzerine olan etkinin gerçek zamanlı ölçümü ve kontrol edilmesi
- Güvenlik önlemlerinin alınmış olması

3.2.1 Düşük güçlü laser ile dikiş kaynak yöntemi

Ortalama kaynak gücü 1000 W'ın altında olan laser türlerine düşük güçlü laserler denilmektedir. Birkaç 100 W'lık laser birçok metalin dikişli kaynağı için yeterlidir. Özellikle darbeli laserler yüzeyle ilk temas sonrası malzemenin laser ışını soğurma

miktarını arttırmaktadır. İster darbeli, ister sürekli laser olsun dalga boyu sebebi ile Nd:YAG laserleri CO₂ laserlerine göre daha fazla absorbe edilmekte ve daha verimli olmaktadır.

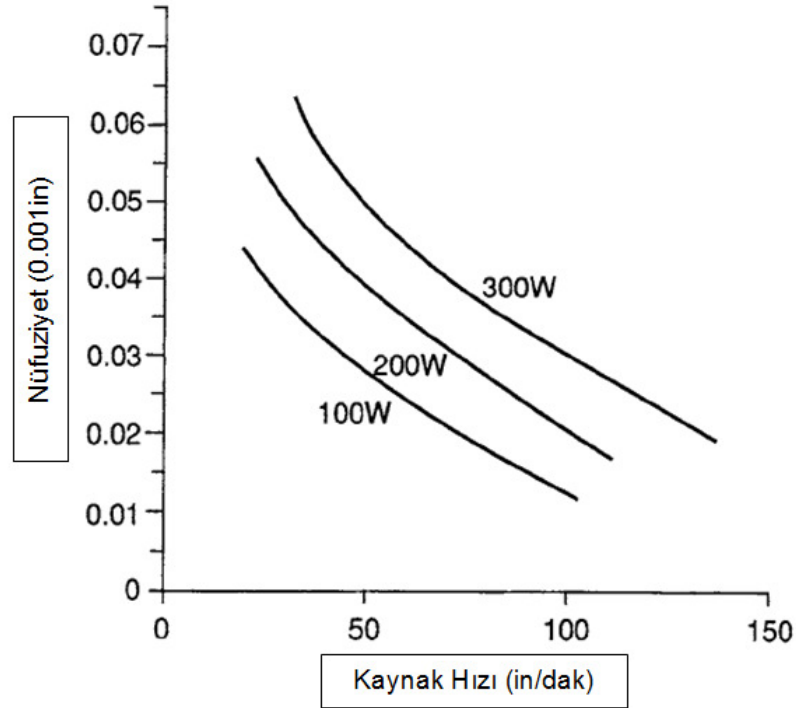
Şekil 3.1'de 375 W'lık sürekli CO₂ laserinin 2 farklı malzeme için yapılmış dikiş kaynağı nüfuziyet derinliğinin hıza göre değişimi verilmiştir.



Şekil 3.1 : 375 W'lık laser gücü ile iki farklı malzemenin hıza bağlı nüfuziyet derinliği grafiği [26].

Şekil 3.1'de görülen nüfuziyet derinliği ve kaynak hızı gibi parametreler birçok uygulama alanı için tatmin edici sonuçlar vermektedir. Ancak yüksek hıza sahip laser kaynak uygulaması sadece ince et kalınlığına sahip parçalara uygulanabilmektedir. Bunun sebebi ısı iletim hızının göreceli olarak düşük olmasıdır (kaynak hızına göre). Nüfuziyet derinliğinin paslanmaz çelik ve karbon çeliklerinde farklı oluşu da ısı iletim hızıyla açıklanmaktadır. Buradan çıkarılacak sonuç nüfuziyet derinliği darbeli laserlerde bekleme süresi arttırılarak arttırılabilir. Ancak bu durum kaynak genişliğinin, yani ısı tesiri altındaki bölgenin de artmasına ve kaynak hızının

düşmesine sebep olacaktır. Şekil 3.2’de nüfuziyet derinliği, hız ve laser gücü parametreleri aynı grafik üzerinde verilmiştir.



Şekil 3.2 : Nüfuziyet derinliğinin kaynak hızı ve güce bağlı olarak değişimi [27].

Çizelge 3.1’de bazı malzemelerin laser kaynağı için özellikleri kıyaslanmaktadır.

Çizelge 3.1’de verilen bilgilerin ışığında CO₂ laser kaynağı birçok malzeme için iyi sonuç vermektedir. Nd:YAG laserleri ise yüksek ısı iletim kat sayısına sahip bakır, gümüş gibi metallerin kaynağında ön plana çıkmaktadır.

Laser kaynağı aynı malzemelerin birbirine kaynatılmasının yanı sıra birbirinden farklı malzemelerin de birbirine kaynatılmasında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Birbirinden farklı birçok malzeme kombinasyonu birbirine iyi / çok iyi şekilde kaynatılırken; titanyum, çinko ve alüminyum alaşımları içeren metallerin kaynağı ise daha zayıf sonuç verebilmektedir. Çizelge 3.2’de alaşım elementlerinin kaynak edilebilirliğe olan etkisi mükemmel – iyi – makul – zayıf olarak gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 : Yaygın kullanılan bazı malzemelerin laser kaynağı için özelliklerinin kıyaslanması [28].

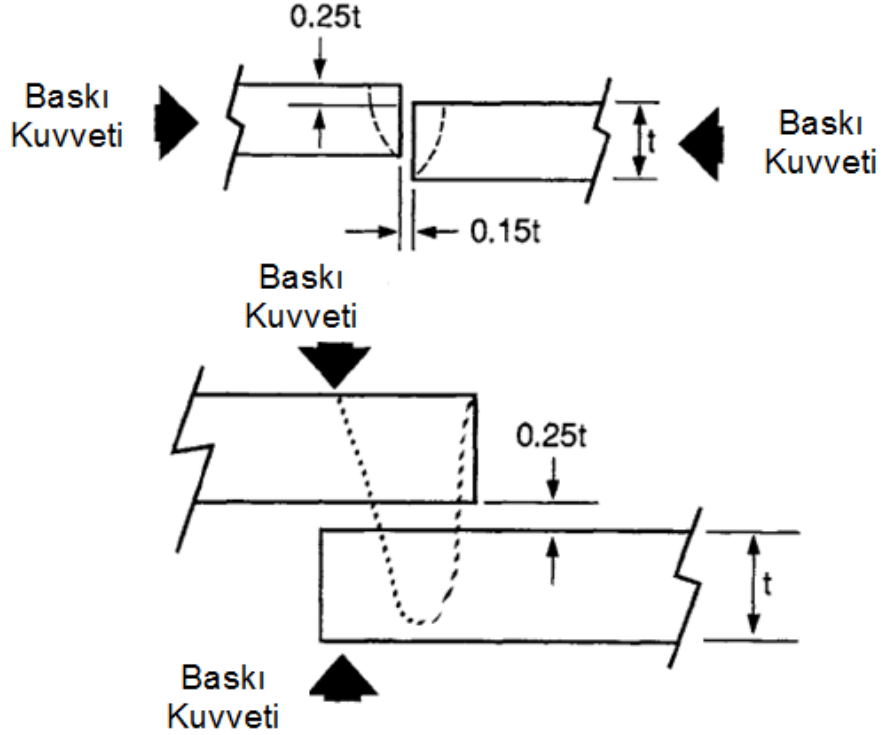
Metal	CO ₂ Laseri ile Kaynak	Nd:YAG Laseri ile Kaynak	Açıklamalar
Alüminyum	Makul-İyi	Makul-İyi	10 µm dalga boyunda yüksek yansıtma özelliği sebebi ile astar boya veya kaplama gerekebilir
Berilyum-Bakır	Zayıf-Makul	İyi	-
Pirinç	Zayıf	Zayıf-Makul	Çinko buharlaşması gözenekler oluşturabilir.
Karbon Çeliği	Mükemmel	Makul-İyi	
Bakır	Makul-İyi	İyi-Mükemmel	10 µm dalga boyunda yüksek yansıtma özelliği var
Galvanizli Çelik	Makul-İyi	-	Çinko buharlaşması gözenekler oluşturabilir.
Hastelloy X (Ni-Cr-Fe-Mo)	Zayıf-Makul	İyi-Mükemmel	Kırılmayı engellemek için yüksek darbe tekrarı gerekebilir.
Inconel (%77 Ni)	Mükemmel	Zayıf-Mükemmel	-
Monel (Max%67 Ni)	İyi	İyi	-
Nikel	İyi	İyi	-
Gümüş	-	Mükemmel	10 µm dalga boyunda çok yüksek yansıtma özelliği var
Paslanmaz Çelik	İyi-Mükemmel	İyi-Mükemmel	-
Titanyum	İyi-Mükemmel	İyi	-
Zircalloy	İyi	-	-

Çizelge 3.2 : Farklı alaşım elementleri içeren parçaların birbirine laser ile kaynak edilebilirliğe elementlerin etkisi [29].

	Ta	Mo	Cr	Co	Ti	Fe	Ni
W	Mükemmel	Mükemmel	Mükemmel	Makul	Makul	Makul	Makul
Ta	-	Mükemmel	Zayıf	Zayıf	Mükemmel	Makul	İyi
Mo	-	-	Mükemmel	Makul	Mükemmel	İyi	Makul
Cr	-	-	-	İyi	İyi	Mükemmel	İyi
Co	-	-	-	-	Makul	Mükemmel	Mükemmel
Ti	-	-	-	-	-	Makul	Makul
Fe	-	-	-	-	-	-	İyi

Laser kaynak yönteminde makinenin tipine göre değişkenlik göstermekle birlikte ya parçalar hareket eder ya da laser ışınının çıkış yaptığı kafa hareket eder. Her iki

durum için de parçalar birbirine ve kaynak tezgahına sıkıca pozisyonlandırılmış olmalıdır. Bu pozisyonlandırma önemli olup malzeme kalınlığına bağlı olarak toleransları belirlenmektedir. Bu toleranslar Şekil 3.3'te verilmektedir.

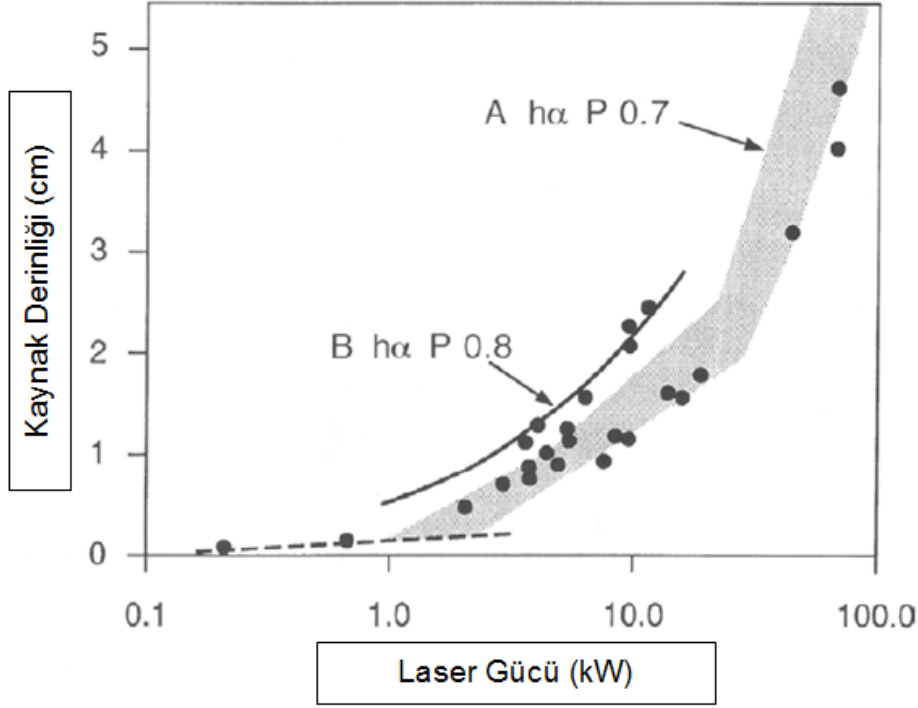


Şekil 3.3 : Malzeme kalınlığına bağlı olarak laser kaynak toleransları [30].

Düşük güçlere sahip CO₂ veya Nd: YAG laseri kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur. Helikopter pervaneleri, gaz türbini kanatları, türbin kanatlarının kaynağı, nükleer yakıt tankının kapakları, metal kesiminde kullanılan sonsuz şerit testerelerin kaynağı gibi birçok sektörde farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe çarpılmanın çok düşük olması istenilen motor ve şanzıman parçaları, hava yastığı parçaları ve gövde parçaları için düşük güçlü laserlerden faydalanılmaktadır.

3.2.2 Yüksek güçlü laser ile dikiş kaynak yöntemi

1000 W'lık güç seviyesinin altındaki laser kaynağı uygulamalarında nüfuziyet derinliği limitli düzeyde kalmaktaydı. Ancak 1970'li yıllarda yüksek güçlü sürekli CO₂ laserinin geliştirilmesiyle yüksek nüfuziyet derinliği laser gücünün fonksiyonu olarak verilmiştir.

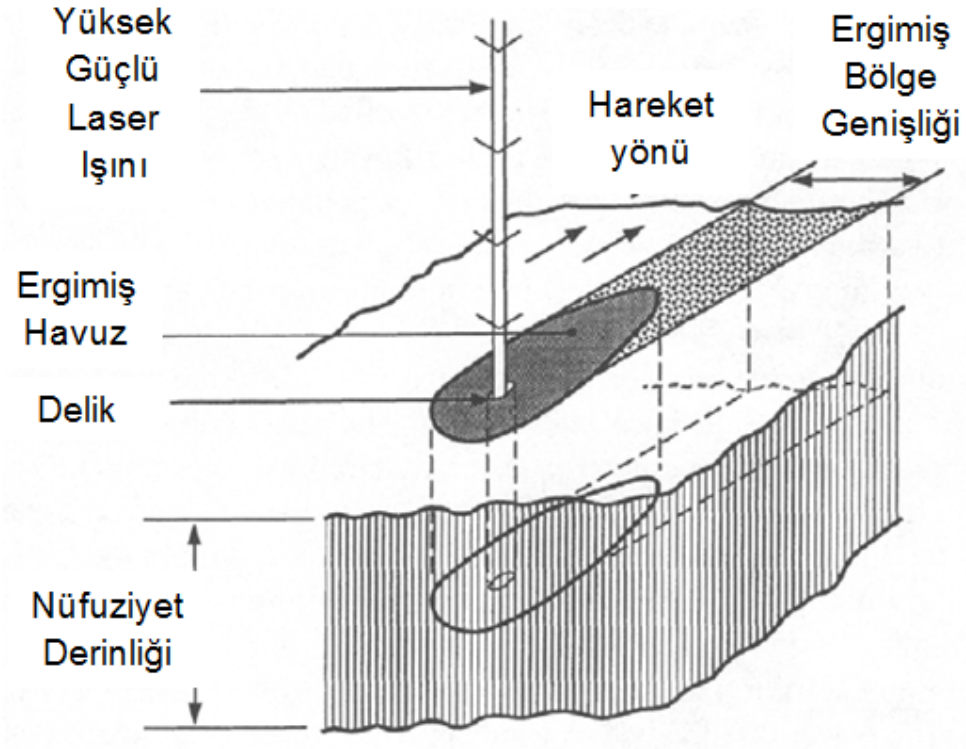


Şekil 3.4 : Nüfuziyet derinliğinin laser gücüne bağlı olarak değişimi [31].

Şekil 3.4'te görüldüğü üzere 1000 W'ın altındaki değerlerde nüfuziyet derinliği oldukça sınırlı bir bölgede kalmaktadır. 1000 W'ın üzerinde ise nüfuziyet derinliği hızla artış göstermektedir. 11 kW mertebesinde ise nüfuziyet derinliği 25mm mertebesine ulaşmaktadır.

Kaynak işleminde yüksek nüfuziyet derinliğini sağlayabilmek için 10^6 W/cm^2 veya daha fazla güç yoğunluğuna sahip enerji malzeme yüzeyine gönderilip bu enerji hızlı bir şekilde yüzey tarafından soğurulmaktadır. Bu koşulların sağlanması durumunda malzemeye bir delik delinir ve gönderilen enerji deliğin dibinde depolanır. Bu proses şekil 3.5'te detaylı olarak gösterilmekte ve açılan delik "klavuz delik"(key holing) olarak isimlendirilmektedir.

Laser ışını malzeme yüzeyi boyunca hareket ederse, delikte malzeme boyunca taşınır. Yüzey gerilmesi ergimiş metalin deliğin etrafına hareket etmesine ve deliğin içinin doldurulmasına sebep olmaktadır. Deliği dolduran ergiyik metal hızla katı faza geçip, dikiş kaynağı formunu almaktadır.



Şekil 3.5 : Klavuz delik açarak gerçekleştirilen yüksek güçlü laser kaynak yönteminin şematiki [32].

Yüksek nüfuziyet derinliklerine ulaşılması için artırılan güç yoğunluğu plazma oluşumuna sebep olabilmektedir. Plazma oluşumunun engellenmesi için bir jet vasıtasıyla yüzeye yüksek hızlı gaz gönderilmektedir.

Yüksek güçlü laserler birçok açıdan elektron ışın kaynağına benzemektedir. Nüfuziyet derinliği ve hız gibi hususlarda elektron ışın kaynağı, laser kaynağına üstünlük sağlamaktadır. Aynı kaynak hızında laser kaynağı, elektron ışın kaynağının nüfuziyet derinliğinin ancak %70'ine ulaşabilmektedir. Ancak elektron ışın kaynağı için ortamın vakumlanması gerekmektedir. Bu da ön hazırlık işlemleri süresini uzatmakta ve maliyetleri arttırmaktadır. Bu sebeple yüksek güçlü laser kaynağı birçok alanda elektron ışın kaynağına göre daha yüksek işlem verimliliğine sahip olması da parça başı maliyeti düşürme yönünde etki etmektedir.

Günümüzde laser kaynağı özel ve hassas parçaların (uzay ve havacılık sektörüne ait) üretimi için kullanılan özel bir proses olmaktan çıkmış ve kendisine birçok uygulama alanı bulmuştur. Direnç kaynağı, ark kaynağı ve elektron ışın kaynağına göre birçok

alanda üstünlük sağlayan laser kaynağı kullanım oranını her geçen gün daha da arttırmaktadır.

Laser kaynağının sağladığı avantajları aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

- Laser kaynağı yüksek enerji yoğunluğuna sahip bir prosestir. Bu sebeple ısı oldukça dar bir bölgeye odaklanabilmektedir.
- Isı tesiri altındaki bölge çok dardır. Bu da ısıya karşı hassas olan parçaların yakınlarına kaynak yapmayı mümkün kılmaktadır.
- Parçaya gönderilen toplam ısı miktarı düşüktür. Bu durum özellikle elektronik sanayi veya düşük çarpılma istenen parçalar için önem arz etmektedir.
- Yüksek enerji yoğunluğu sebebi ile kaynak edilme oranı yüksektir. Proses verimi yüksek olduğundan seri imalatla ekonomiklik açısından avantaj sağlamaktadır.
- Parça ile herhangi bir temas olmadığından; herhangi bir aşınma etkileşim söz konusu değildir.
- Laser kaynağı atmosfer şartlarında veya basit bir koruyucu gaz ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Elektron ışın kaynağında olduğu gibi vakum ortamına ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Yüksek nüfuziyet derinliklerine ulaşılabilirdiğinden birçok kaynak yöntemine göre daha dayanıklı kaynak dikişleri sağlanabilmektedir.
- Yüksek ergime sıcaklıklarına sahip metallerin kaynağı laser kaynağı ile daha hızlı ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- Laser kaynak yöntemi ile ince et kalınlığına sahip parçaların kaynağı sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.
- Laser kaynağı birçok yazılım vasıtasıyla kontrol edilebildiğinden yüksek tekrarlanabilirlik özelliğine sahiptir. Özellikle yüksek üretim adetlerine sahip parçaların üretiminde bu durum avantaj sağlamaktadır.

Laser kaynağının tüm bu avantajlarının yanında dezavantajlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür;

- Laser kaynak sisteminin ilk yatırım maliyeti, bakım ve yedek parça maliyeti yüksektir.
- Kaynak edilebilir parça kalınlığı sınırlıdır.
- Yüksek yansıtma özelliğine sahip parçaların kaynağı sınırlıdır.
- Yüksek ısı iletkenliğe sahip parçaların kaynağında; kaynak için harcanan enerjinin verimliliği ve kaynak kalitesi düşmektedir.

Çizelge 3.3'te yüksek güçlü laser kaynak yönteminin elektron ışın kaynak yöntemi, direnç kaynak yöntemi ve TIG kaynak yöntemi ile mukayeseleri verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Yüksek güçlü laser kaynağının bazı özelliklerinin diğer kaynak yöntemleri ile kıyaslanması.

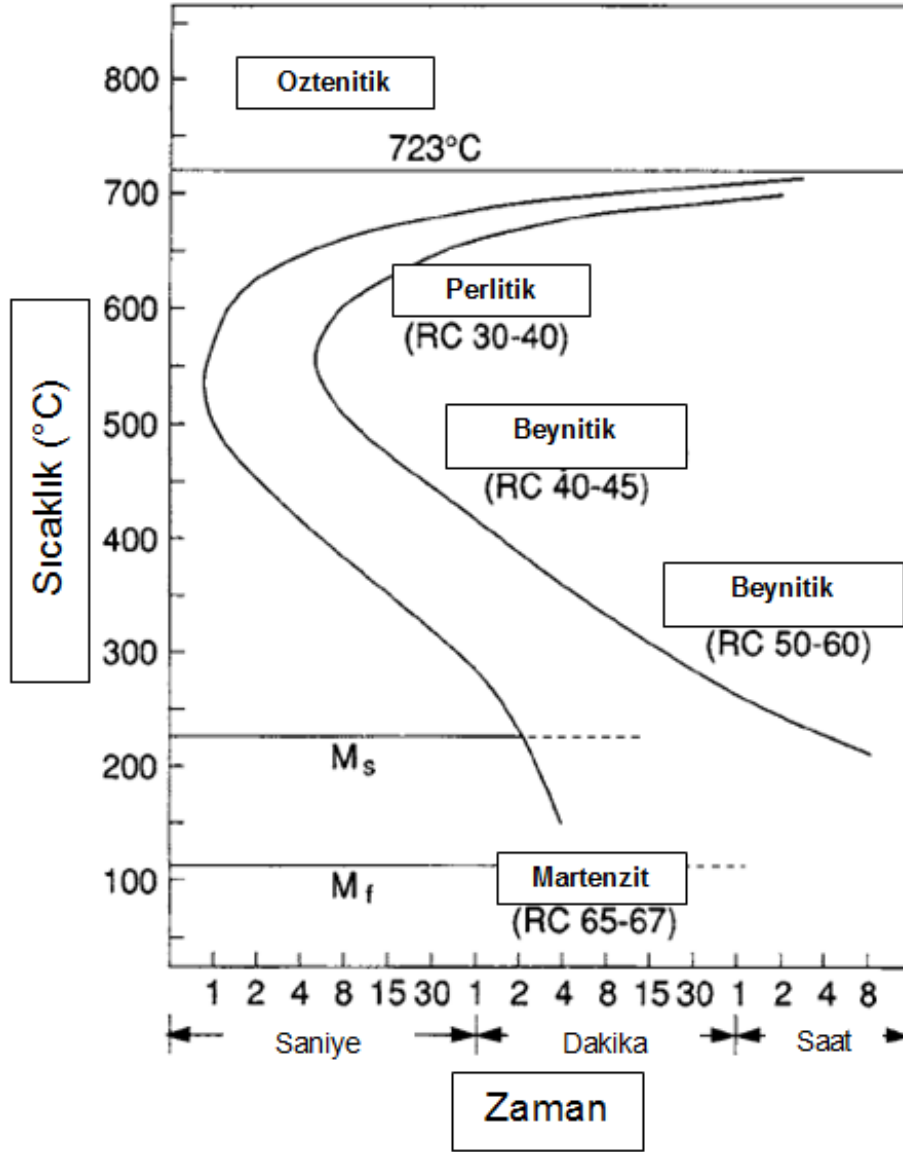
Özellik	Laser	Elektron Işın	Direnç	TIG
Kaynak kalitesi	Mükemmel	Mükemmel	İyi	Mükemmel
ITAB	Çok dar	Dar	Orta	Geniş
Kaynak Oranı	Yüksek	Yüksek	Orta	Orta
Kalınlık	Sınırlı	Yüksek	Orta	Yüksek
Ekipman Maliyeti	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Fikstür Maliyeti	Düşük	Yüksek	Yüksek	Orta

3.3 Laser İle Yüzey Sertleştirme

Laser ile yüzey sertleştirme prosesi günümüzde ağırlıklı olarak yüzeylerin aşınma direncini arttırmak için kullanılmaktadır. Bazı özel durumlar için ise korozyon direncinin artırılması amacıyla da kullanılmaktadır. Laser ile yüzey sertleştirme yöntemini yüksek güçlü CO₂ laserleri domine etmiş olsa da Nd:YAG, CO ve Excimer laserlerinin de kullanıldığı uygulamalar bulunmaktadır.

Laser ile yapılan yüzey işlemleri arasında yüzey sertleştirme en çok uygulanan metottur. Yüzey sertleştirme işlemi için en çok kullanılan CO₂ laserlerinin kullanım sebebi en yüksek seviyede kesintisiz güç üretebilmesidir. Laser ışını yüzeye etki ettiğinde yüzeye yakın olan ince bir katmanın süratle ısınmasını sağlamaktadır. Laser ışını farklı bir alana taşındığında ise ısıtılan ince katman ısı iletim katsayısına bağlı

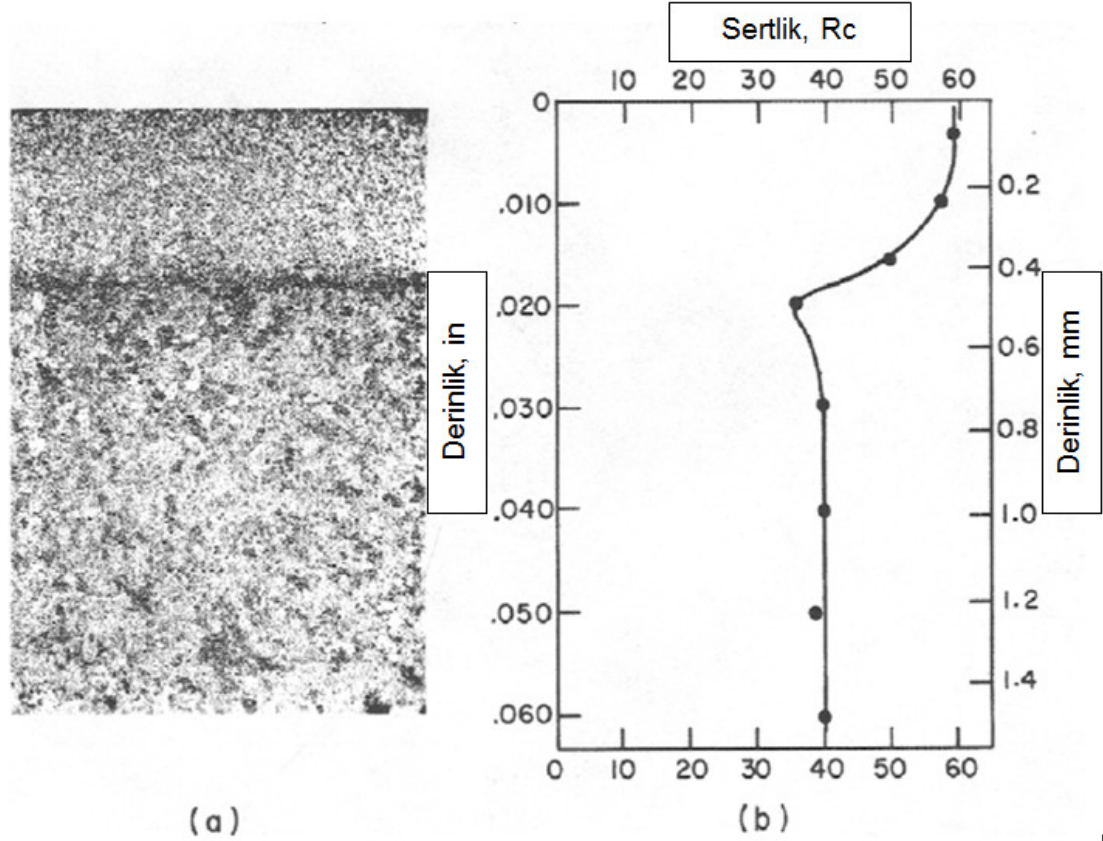
olarak hızla soğumaktadır. Hızlı soğuma işlemi yüzeylerin sertliğini arttırmaktadır. Eğer çelik için konuşacak olursak ısıtılan tabakanın yeterince hızlı soğutulması sağlanırsa yapı oda sıcaklığında daha sert olan martenzitik faza dönüşmektedir.



Şekil 3.6 : %0,8 karbon içeren çeliğin sıcaklık, zaman, dönüşüm grafiği [33].

Şekil 3.6'da %0,8 karbon içen çeliğe ait zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramı verilmiştir. Çelik 723 °C'nin üzerindeki bir sıcaklığa çıkartıldığında yapı östenitik faza dönüşmektedir. Ardından çelik soğumaya başladığında soğuma hızına bağlı olarak farklı yapılar oluşturabilmektedir. Perlit yapı 20-40 RC sertliğine sahipken, martenzitik yapı 65-67 RC sertliğe sahip olabilmektedir.

Laser ile ısıtım yönteminde; laser malzeme yüzeyinin ergimeye başlamaması için hızla hareket eder. Yüzey sıcaklığı hızla 723 °C'nin üzerindeki östenitik faza çıkartılır. Laser ışını farklı bir bölgeye hareket ettirildiğinde ise yüzeyin ince bir katmanında depolanan ısı ısıtım difüzyon ile malzemenin iç kısımlarına doğru iletilir ve bu durum parçanın hızla soğumasını sağlamaktadır. Bu soğuma hızı martenzitik yapıyı oluşturup parçanın yüzey sertliğini, dolayısı ile aşınma direncini arttırmaktadır.

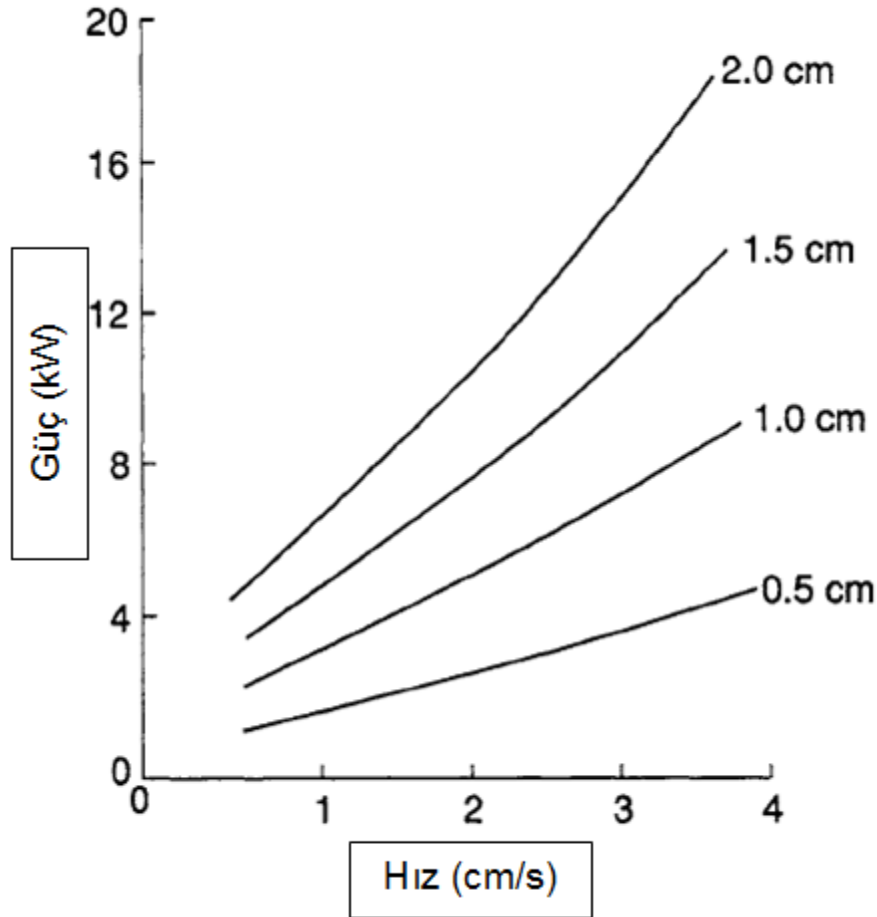


Şekil 3.7 : 1040 karbon çeliğinin yüksek güçlü CO₂ laseri ile sertleştirilmesi [34].

Şekil 3.7’de 1040 karbon çeliğinin yüksek güçlü CO₂ laseri ile sertleştirilmesine ait sonuçlar gösterilmiştir. a’daki şekilde parçanın yüzeye yakın bölgedeki iç yapı değişimi, b’deki şekil ise derinliğe bağlı yüzey sertlik fonksiyonunu vermektedir. Şekilde de görüldüğü üzere yüzeye yakın olan taneler daha ince bir yapıya dönüşmüştür. Rockwell C sertlik ölçüm metodu baz alındığında parçanın başlangıç ortalama sertlik değeri 40 RC iken laser ile sertleştirme işlemi sonrası yüzey sertliği 60 RC’ye kadar ulaşmaktadır. Hızlı ısıtma ve hemen ardından hızla soğutmanın sertleşmeye olan etkisi şekilde açık bir şekilde verilmiştir.

Sertleştirilmiş derinlik termal iletkenlik ile doğrudan ilişkilidir. Ayrıca sertleştirme derinliği laser gücü, ışık odaklanma çapı ve hız ile de ayarlanabilmektedir. Daha fazla sertleştirme derinliği için bu parametrelerin optimum değerlere çekilmesi gerekmektedir.

Laser ile yüzey işlemlerinde kullanılan ve laser gücü, hız ve ışın çapı parametrelerinden uygun parametrelerin seçimi sağlayan “Harth diyagramı” adı verilen bir diyagram bulunmaktadır. Şekil 3.8’de 0,56mm sertleştirme derinliğine sahip karbon çeliğine ait Harth diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8 : 0,56mm sertleştirme derinliğine sahip karbon çeliğinin Harth diyagramı[35].

Laser ile yüzey sertleştirmede kaçınılması gereken en önemli nokta; yüzeyde ergime olmamasıdır. Bu sebeple yüzey sertleştirmede kullanılan güç yoğunluğu, laser ile kesme veya kaynak yöntemlerine göre daha düşüktür. Tipik bir yüzey sertleştirme işleminde 10^4 W/cm^2 'lik güç yoğunluğu kullanılmaktadır. Bu değerler ile 0,75 mm

sertlik derinliğine ulaşılabilir. Bu değerler laser ile yüzey sertleştirmeyi hem teknik açıdan yeterli, hem de ekonomik bir yöntem kılmaktadır.

Laser ile yüzey sertleştirme işleminin başarılı olabilmesi için malzeme yüzeyinin yüksek dalga boyuna sahip laser ışınlarını büyük oranda soğurması gerekmektedir. Çünkü laser ile yüzey sertleştirme işlemlerinin tamamına yakını yüksek dalga boylu laser ışını üreten CO₂ laseri ile gerçekleştirilmektedir. Yüksek yansıtma özelliğine sahip parçaların yüzeylerine kaplama yapılarak laserden gelen enerjinin malzeme tarafından soğurulup malzeme içine iletilmesi sağlanabilmektedir. Ancak kaplama kalınlığı önemli bir parametre olmaktadır. Kaplama kalınlığının fazla veya az olması sertleştirme derinliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Malzeme yüzeyine kaplanacak yüksek soğurma özelliğine sahip malzemelerin geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Hali hazırda polikristal Tungsten, grafit, kübik oksid, molibden di-sülfid ve mangan-fosfat yaygın olarak kullanılan kaplama malzemeleridir.

Seçilen yüzeyin, parça üzerinde herhangi bir çarpılma olmadan göreceli olarak yüksek derinliklerde sertleştirilebilmesi için laser ile yüzey sertleştirme işlemi uygun bir yöntemdir. Özellikle tüm yüzey yerine lokal sertleştirmenin yapılacağı parçalarda üstünlük sağlamaktadır. Otomotiv sektörü aşınma direncinin artırılması için kullanılan laser ile yüzey sertleştirme yönteminin en yoğun kullanıldığı sektördür. Krank mili, turbo rotor mili, silindir bloğu, dizel motor silindir hatları laser ile sertleştirme yönteminin kullanıldığı rutin parçaları oluşturulmaktadır. Ancak laser ile sertleştirme yöntemi, laser kesim ve kaynak yöntemleri gibi diğer sektörlerde pek fazla yer edinememiştir. Bunun sebebi yüksek güçlü laser teknolojisinin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır.

3.4 Laser İle Delik Delme

Laser ile malzeme boşaltma teknolojisinde, kaynak yönteminden farklı olarak birçok laser türü kullanılabilir. Malzeme boşaltmada kullanılan laserlerin darbe süreleri daha kısayken, laser ışını güç yoğunlukları daha yüksektir. Sürekli laserler ise malzeme boşaltma için çok tercih edilmemektedir. Çizelge 3.4'te malzeme boşaltmada kullanılan bazı laser türlerinin uygulama alanları verilmiştir. CO₂ ve Nd:YAG laserleri günümüzde malzeme boşaltmada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Excimer laseri ise dalga boyu sebebi ile, CO₂ ve Nd:YAG laserinin absorpsiyon problemi yaşadığı malzemelerde tercih edilmektedir. Ruby ve Nd: Glass laserleri ise malzeme boşaltma teknolojisinin ilk evrelerinde kullanılmış olsa da günümüzde popülerliklerini yitirmiştir.

Çizelge 3.4 : Laser türlerinin dalga boyları ve yaygın olarak kullanıldıkları imalat yöntemleri.

Laser	Dalga Boyu(μm)	Tipik Uygulamalar
Nd:YAG(darbeli)	1.06 ve 0.532	Delik delme, Markalama
Nd:YAG(sürekli)	1.06 ve 0.532	Kesme,İnce film boşaltma
CO ₂ (darbeli)	10.6	Kesme, delik delme
CO ₂ (TEA)	10.6	Balans alma
Eksimer	0.19-0.35	Markalama, yarı iletken işleme
Ruby	0.6943	Delik Delme
Nd:GLASS	1.06	Delik Delme

Delik delme laserin malzeme uygulamaları hakkındaki en önemli ve en sık başvuru alanıdır. Günümüzde laser ile delik delme prosesi nozüllere kanalların açılması, uçak türbin kanatlarındaki soğutma kanalları, havalandırma kanalları, pin yuvaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

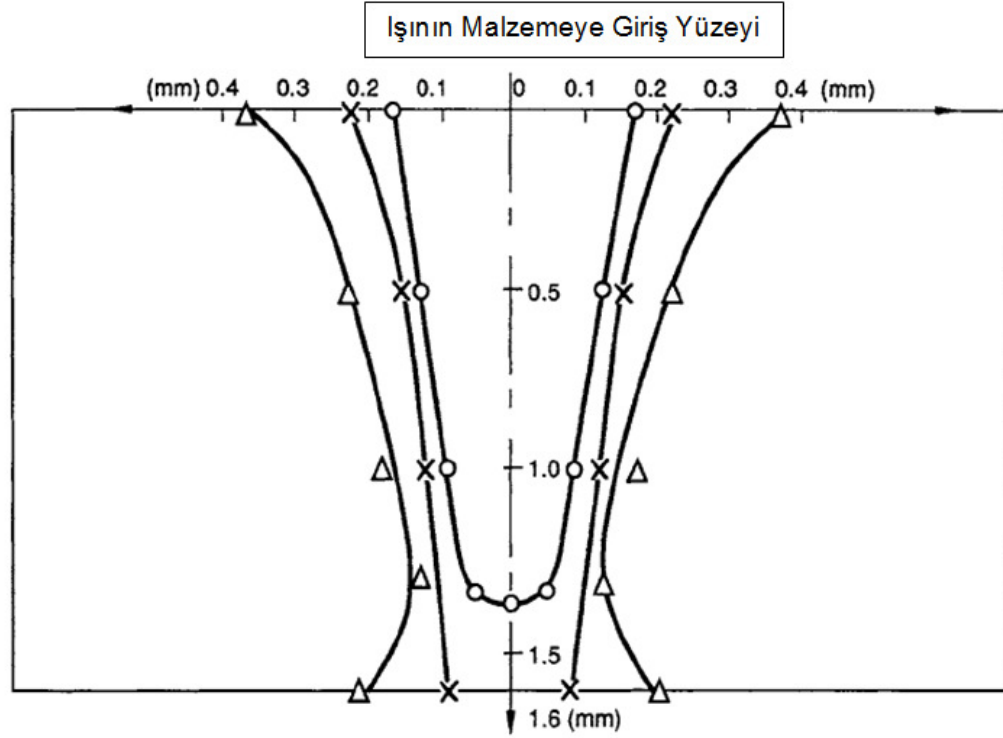
Laser ile 0,02 mm çapındaki delikler standart olarak açılabilirken, özel uygulamalarda 0,003 mm çapındaki delikler de açılabilir. Ayrıca delikler çevresinde oluşan ısı tesiri altındaki bölge çok dar olup 0,025-0,05 mm mertebesindedir.

Laser ile açılan delikler Şekil 3.9’da gösterildiği üzere konik bir geometriye sahiptir. Şekil 3.9’da Ruby darbeli laseri ile alüminyum üzerine farklı farklı açılan üç deliğin geometrisi üst üste çakıştırılmıştır. Şekil 3.9’da da görüldüğü gibi laser enerjisi arttırıldıkça delik çapı ve derinliği artmaktadır. Delik çapı malzeme yüzeyinde büyükken aşağıya doğru indikçe küçülmektedir. Deliğin malzemenin alt yüzeyinden çıkışında ise delik çapı tekrardan büyümektedir. Bunun sebebi ise delik içerisinde buharlaşmadan kaynaklanan basıncın artmasıdır.

Laser ile delme metodunda enerjinin dengesi modelinden faydalanılarak deliğin derinliği (3.1) formülü ile hesaplanabilmektedir.

$$D = \frac{E_0}{A d [c (T_B - T_0) + L]} \quad (3.1)$$

Burada D , deliğin derinliği; E_0 laser darbe enerjisi; A ışının etki ettiği alan; d yoğunluk; c ısı kapasite katsayısı; T_B buharlaşma sıcaklığı; T_0 ortam sıcaklığı; L buharlaşmanın “latent” ısısidir.

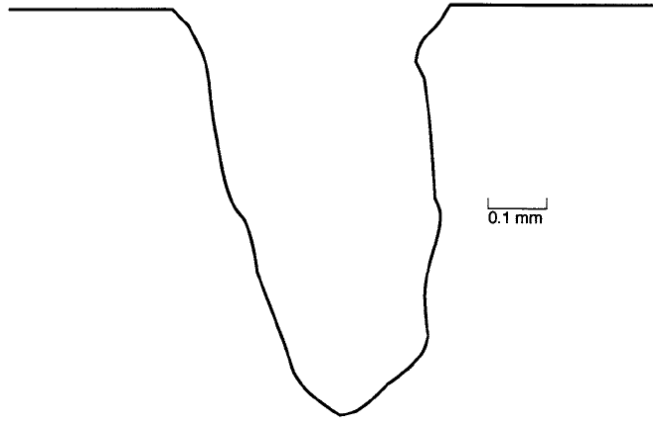


Şekil 3.9 : Ruby darbeleri ile alüminyum üzerine farklı farklı açılan üç deliğin geometrisi [36].

Bütün avantajlarının yanında laser ile delme yönteminin bazı kısıtları bulunmaktadır. Bunlardan ilki nüfuziyet derinliğidir. Laser ile delik delmek için enerjinin kısa darbeler yerine daha uzun darbe veya sürekli olarak gönderilirse, metal üzerinde ısı daha fazla hacme etki eder. Bu durum ise laser teknolojinin sağladığı avantajları ortadan kaldırır. Düşük kalınlıktaki parçalara delik açılması düşük enerjili bir veya birkaç darbe ile sağlanabilmekteyken, parça kalınlığı arttıkça ihtiyaç duyulan enerji de artmaktadır. Küçük çaplı delikler için derinlik 12 – 25 mm arasında sınırlı kalmaktadır.

Laser ile delik delme metoduna ait bir diğer sınırlama ise delik kalitesidir. Şekil 3.10’da laser ile delinmiş tipik bir örnek gösterilmiştir. 5J’luk tek darbe ile Nd:Glass laseri kullanılarak açılan delik birçok hata içermektedir. Koniklik, delik merkezinin ofsetlenmesi, yüzeye dik olmaması, tam yuvarlak olmaması ve pürüzlü yüzey

karşılaşılan başlıca problemlerdir. Bu problemlerin bazıları ortadan kaldırılabilse de tümü tamamen ortadan kaldırılıp mükemmel delik formu oluşturulamamaktadır.



Şekil 3.10 : Laser ile delinmiş tipik bir delik formu [37].

Karşılaşılan bir diğer problem ise laser ışınının yüzey ile temas ettiği kısımda bir krater oluşmasıdır. Laser ışınının malzemeyi geçip çıktığı yüzeyde herhangi bir sorun oluşmazken ışının ilk girdiği yüzeyde buharlaşma ve ergiyip metalin dışarı çıkışından dolayı bir ağız oluşmaktadır. Bu krater oluşumu delik delinmesinin ardından mekanik yolla veya delik delinmesi öncesi kaplama yapılarak önlenebilmektedir. Ancak bu ek proses ek zaman ve maliyet anlamına gelmektedir.

Laser ile delik delme yöntemi bazı kısıtlamalara sahip olsa da onu kullanışlı kılan birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan bazıları aşağıdaki gibidir;

- Büyük derinlik / boy oranına sahip delikler ekonomik bir şekilde delinebilmektedir.
- Proses tamamen otomatiktir ve kolayca kontrol edilebilmektedir.
- Mekanik aşınma söz konusu değildir. Delik delmede kullanılan takımların aşınması gibi bir durum ortadan kaldırılmıştır.
- Delinmesi zor olan seramik ve cam gibi sert malzemeler kolaylıkla delinebilmektedir.
- Seramik parçaların delinme prosesleri esnasındaki kırılma oranı mekanik yollarla delik delmeye oranla çok düşüktür.

- Parça ile direkt temas olmadığından, parça üzerinde herhangi bir etkileşim veya hasar oluşmamaktadır.
- Delik çevresinde oluşan ısı tesiri altındaki bölge oldukça sınırlı olduğundan, ısıya karşı hasas parçaların işlenmesinde avantaj sağlamaktadır.
- İnce et kalınlığına sahip parçalara en küçük delik çapını açabilen yöntemdir.

Tüm bu avantajları sebebi ile laser ile delik delme metalik veya metalik olmayan malzemelerin işlenmesinde kendine yer bulmaktadır. Özellikle ısı tesiri altındaki bölgenin dar oluşu, yöntemin metalik olmayan malzemeler üzerinde kullanımını arttırmaktadır. Öyle ki 100 W'lık bir CO₂ laseri birçok metalik olmayan malzemelerde delik açmak için yeterli olmaktadır.

Laser teknolojisi ile delik delme işlemi 1960'lı yılların başlarına kadar dayanmaktadır. Özellikle oldukça sert olan elmas yüzeyine açılması gereken delikler konvansiyonel yollarla açıldığında takımda meydana gelen aşınma sebebi ile maliyeti yüksek bir proses olmaktadır. Laser teknolojisinin bu alanda kullanımı ile maliyetler oldukça düşürülmüştür.

Belki de laser ile delik delme teknolojisinin en fazla kullanıldığı alan seramik malzemelerin delinmesidir. Bu da elektronik sektörünü yakından ilgilendirdiği anlamına gelmektedir. Seramik malzemelerin laser teknolojisi ile delinmesinin en önemli sebebi CO₂ laser ışınını yüksek oranda soğurmasıdır. Özellikle alümina seramiklere mekanik yollarla delik delinmesi çok zor olduğundan bu alanda laser teknolojisinin kullanımı popüler hale gelmiştir. Bu malzemelerin mekanik yollar ile delinebilmesi için pahalı olan elmas uçlu sertleştirilmiş çelik takımların kullanılması gerekmektedir. 0,25 mm çapa sahip deliklerin ise mekanik yollarla açılması sık sık takım kırılmasına sebep olduğundan oldukça pahalı bir yöntem olmaktadır. Ayrıca mekanik yollarla delik açma işlemi esnasında seramik parça üzerinde çatlak veya kırılma riski çok yüksektir. Tüm bu sebeplerden dolayı laser ile delik delme işlemi seramiklerin delinmesinde çok büyük avantajlar sunmaktadır.

Çizelge 3.5'te laser ile delik delme yönteminin diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Laser ile delik delme yönteminin diğer yöntemlere göre avantaj ve dezavantajları.

	Laser ile Delme	Mekanik Delik Delme	Elektrikli Dalma Erezyon
Avantajlar	-Yüksek hız -Kolay Sabitleme -Aşınma veya kırılma olmaması -Temassız işlem -Dar ITAB -Düşük işletme Maliyeti -Birçok malzemeye uygulanabilirlik	-Büyük derinlik -Büyük Çap -Düz/doğru delikler -Düşük ekipman maliyeti	-Büyük derinlik -Koniklik olmaması -Düşük ekipman maliyeti
Dezavantajlar	-Delikte konikleşme -Limitli derinlik/çap oranı -Yüksek ekipman maliyeti	-Takım aşınması/kırılamsı -Düşük hız -Uzun ayar zamanı -Düşük delik çapı -Sınırlı malzemelere uygulanabilirlik	-Düşük Hız -Uzun ayar zamanı -Yüksek işletme maliyeti -Sınırlı malzemelere uygulanabilirlik

3.5 Laser İle Markalama

Markalama işlemi parçaları tanımlama amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Parça üzerine kimi zaman ürün hakkında bilgi, kimi zaman parça numarası, kimi zaman firma logoları markalama yöntemi ile işlenmektedir. Bu işlemler konvansiyonel yöntemler olan boyama, damgalama, mekanik markalama veya kumlama gibi yöntemlerle yapılabilmektedir.

Laser ile markalama ise tüm bu konvansiyonel yöntemlere esneklik ve daha karmaşık şekilleri markalama imkanı sunmaktadır. Ayrıca laser ile markalama yöntemi beraberinde birçok avantajı da yanında getirmektedir. Bu yöntem neredeyse tüm malzemelere yüksek kalitede uygulanabilmektedir. Laser ile markalamada parçaya herhangi bir temas olmadığından parça üzerinde bir şekil değişimi veya reaksiyon gerçekleşmemektedir. Parçaların markalanmasını ekonomik olarak sunabilen laser ile markalama yöntemine ait en büyük dezavantaj ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasıdır.

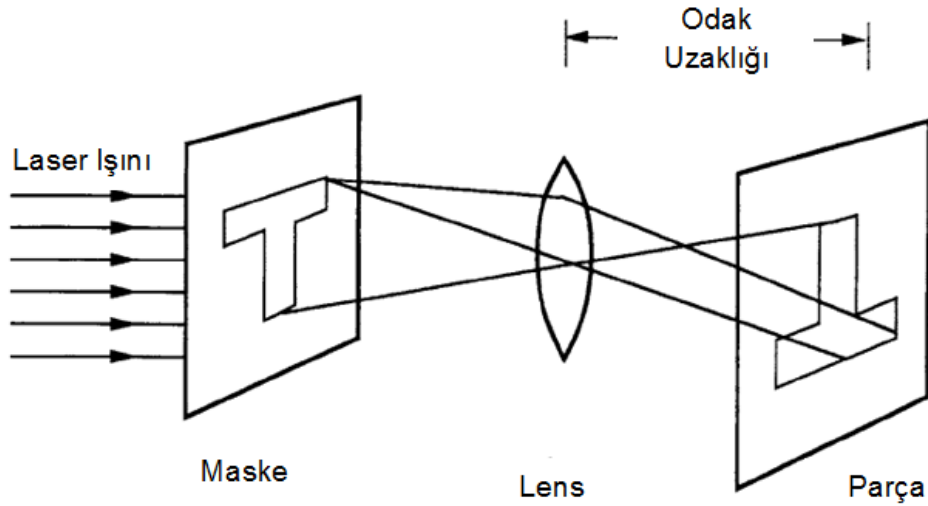
Laser ile markalama yöntemi farklı yollarla gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki laser ışınının markalanmak istenen yüzeyi tarayıp, düşük miktarda malzemeyi buharlaştırarak markalanacak şekli oluşturmasıdır.

Laser ile yüzeylerin taranması metodunda birçok malzeme tarafından soğurulabilen düşük dalga boyuna sahip Nd:YAG laserleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Nd:YAG laserleri kısa darbe, yüksek pik gücü sunmaktadır.

Laser ışını ile yüzeylerin taranarak markalanması özellikle yüksek sertliğe sahip veya sonraki işlemlerde kaynaklanabilecek parçaların markalanması işlemlerinde üstünlük sağlamaktadır. Bu yöntem ile parça üzerinde derinliği 0,15 mm derinliğinde kanallar açılarak markalama gerçekleştirilmektedir.

Laser ışını ile markalamada kullanılan bir diğer yöntem ise mikro talaş kaldırma olarak bilinmektedir. Bu yöntemde markalanmak istenen tüm şekil tek bir yüksek güçlü odaklanmış laser darbesi ile gerçekleştirilmektedir. Laser ışını bir maske vasıtasıyla yüzeye düşürülür. Bu yöntem düşük buharlaşma sıcaklığına sahip organik malzemeler gibi malzemelere yaygın olarak CO₂ laseri ile uygulanmaktadır.

Mikro talaş kaldırma yöntemi ile karmaşık sayılabilecek şekiller tek bir darbe ile oluşturulabilmektedir. Şekil 3.11’de yöntemin nasıl çalıştığını gösteren bir şema verilmiştir.

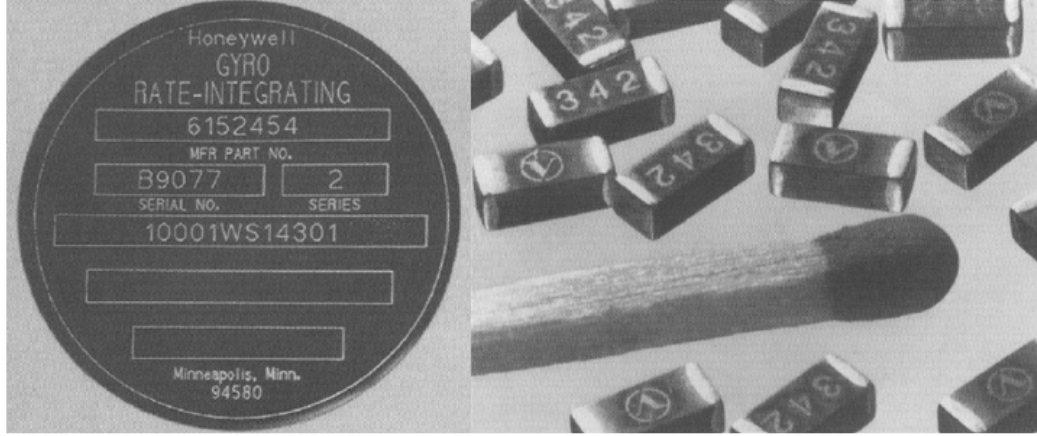


Şekil 3.11 : Laser ile markalama yönteminin çalışma şeması [38].

Şemada görüldüğü üzere laser ışını önüne bir maske konulmaktadır. Bu maskeden geçen ışınlar yüzeye ulaşmakta ve eğer laser ışınının güç yoğunluğu yeterli ise yüzeyden buharlaşma gerçekleşmektedir. Laser ışınının etki ettiği yüzey alanı büyüdüğünden oldukça büyük güçlere ihtiyaç vardır. Bu sebeple tahta, kağıt gibi

daha düşük güç yoğunlukları ile buharlaşma sağlanabilecek malzemeler bu yöntem ile markalanmaktadır. Organik malzemelerin CO₂ laser dalga boyunu soğurma oranı yüksek olduğundan CO₂ laserleri tercih edilmektedir. Günümüzde CO₂ laserleri ile 1cm² 'lik bir alana sahip şekil mikro talaş kaldırma yöntemi ile markalanabilmektedir.

Şekil 3.12'de her iki yöntemle de yapılan markalama örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.12 : Laser ile markalama yapılan parça örnekleri.

3.6 Laser İle Kesme

Laser ile kesme işlemi, laser ışınının bir doğru veya bir eğri boyunca hareket ettirip bu sırada malzemenin ergimesi, buharlaşması veya süblimleşmesi yoluyla parçayı iki ayrı bölüme ayırma esasına dayanmaktadır. Ayrıca kesim yapılan bölgeye hariçten gaz gönderilmektedir. Gönderilen bu gaz laser ile kesim esnasında kesim alanını atmosfer ortam gazlarından korumakta, bir yandanda eriyen malzemenin kesim alanından uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Bazı durumlarda ise egzotermik reaksiyonlara girip daha düşük laser enerjisi ile daha fazla enerji gerektiren işlemler gerçekleştirilebilmektedir.

Çizelge 3.6 : Laser ile kesmeye ait örnekler.

Malzeme	Yaklaşım	Örnek
Düşük iletkenlik	Laser ile direk buharlaştırma	Elbise
Yüksek iletkenlik,aktif olmayan	Laser ile ergitme ve gaz jeti ile ergimiş malzemeyi uzaklaştırma	Paslanmaz Çelik
Yüksek iletkenlik,aktif	Laser ile egzotermik reaksiyonu tetiklemek için ısıtma	Titanyum

Çizelge 3.6’da laser kesimin farklı durumları için örnekler verilmiştir. Organik malzemeler gibi düşük ısıl iletkenlik katsayısına ve düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelerin oksijen ile yakılarak kesilmesinde ihtiyaç duyulan enerjiden daha az laser enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. İhtiyaç duyulan ısıнын büyük bölümü egzotermik reaksiyondan açığa çıkan ısı ile karşılanmaktadır.

Laser ile kesim işleminde kesilen kısımdan malzemenin uzaklaştırılmasına göre 3 farklı yöntem mevcuttur. Bu yöntemler işlem görece malzemeye göre belirlenmekte ve aşağıdaki gibi sıralanmaktadır.

- Süblimleştirme ile kesme
- Yakarak kesme
- Ergiterek kesme

3.6.1 Laser ile süblimleştirerek kesme

Süblimleştirerek kesme yönteminde malzeme laser ışınının etkisiyle katı halden doğrudan buhar fazına geçmektedir. Bu tür kesme yöntemi, katı - ergiyik geçiş fazı tam belirgin olmayan veya ergiyik halde çok dar sınırlarda kalan, tahta, kağıt, seramik ve plastik gibi malzemeler üzerinde uygulanmaktadır.

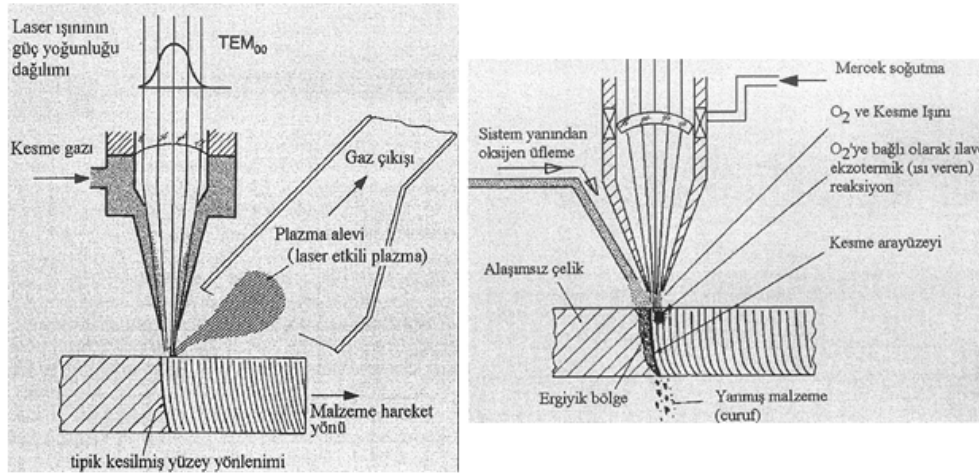
Laser ile süblimleştirerek kesme yöntemi darbeli laser ile metallerin kesilmesi için çok uygun bir yöntem değildir. Çünkü bu yöntemin metallere uygulanabilmesi için çok yüksek laser gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Kalın parçaların süblimleştirerek kesilmesi için de uygun bir yöntem değildir. Kalın parçaların kesimi esnasında buharlaşan malzeme, kesme işlemi esnasında oluşan kapılar aralığı tekrar kapatmaktadır.

Süblimleştirerek kesme yönteminde hemen hemen ergime olmamakta ve ilave gazın yardımıyla parlak bir kesim yüzeyi elde edilebilmektedir. Yüksek ve genellikle darbeli verilen enerji çok dar ısı tesiri altındaki bölge oluşturmaktadır. Kesilen kenarlarda oksidasyon oluşmaması sebebi ile sonradan yapılacak ikincil operasyonlara ihtiyaç kalmamaktadır. Bu sayede diğer konvansiyonel yöntemlere üstünlük kurmaktadır. Bazı durumlarda ise kesme yüzeylerinde yanma lekeleri de oluşmaktadır.

Süblimleştirerek kesme yöntemi sahip olduğu üstün özelliklerin yanında aşağıdaki dezavantajlara da sahiptir;

- Bu yöntemin kesme hızı, ergiterek kesme hızına göre çok daha düşüktür. Metalsel malzemelerde 1mm kalınlığa kadar bu yöntemden faydalanılmaktadır. Bu sebeple çok sınırlı bir kalınlık aralığında çalışılabilmektedir.
- Odaklanma yerine göre, eğer kesme işlemi malzemenin içinde başlatılmışsa, oluşan plazma bulutu malzemeyi etkileyerek kesme yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açabilmektedir. Böylesine tehlikeli bir metal buharının ortamdan uzaklaştırılması için, işletmelerde bir filtre sisteminin kurulması gerekmektedir.

Laser ile süblimleştirerek kesme şeması şekil 3.13'te verilmektedir.



Şekil 3.13 : Laser ile süblimleştirerek kesme şeması [39].

3.6.2 Laser ile yakarak kesme

Bu yöntem metallerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında, oksijen ilave kesme gazı olarak laser kesim ortamına gönderilmektedir. Ortamın oksijenle zenginleşmesi ile dışarıya ısı veren (egzotermik) yanma tepkimesi oluşmaktadır. Bu tepkime laser ışınlarından sağlanandan daha yüksek bir ısı gücü oluşturmaktadır.

Laser ile yakarak kesme yönteminde kesme hızları da yüksek olup, ergiterek veya süblimleştirerek kesme yöntemlerine göre daha yüksek kesme hızlarına sahiptir.

Alaşımsız bir çeliğin yakarak kesilmesindeki aşamalar aşağıda verilmektedir.

- Malzemenin ön ısıtılması
- Fe ve C kısımlarının yanması
- Cürufun kesme yüzeyinden uzaklaştırılması
- Parçanın laser ışınının ilerlemesi ile kesilmesi

Yakarak kesme işleminin gerçekleşebilmesi için aşağıdaki özelliklerin sağlanabiliyor olması gerekmektedir.

- Malzeme yanabilme (oksijen ile tepkimeye girme) özelliğine sahip olmalıdır.
- Metalin yanma sıcaklığı, ergime sıcaklığından yüksek olmalıdır.
- Metal oksidin ergime sıcaklığı, metalin yanma sıcaklığının altında olmamalıdır.
- Oksit düşük viskoziteye sahip olmalıdır.
- Yanma ısısı mümkün olduğunca büyük olmalıdır.
- Malzemenin ısı iletim katsayısı düşük olmalıdır.

Kesme hızının yüksek olması ve nispeten kalın sayılabilecek malzemelerin kesimi bu yöntemin avantajlarıken, kesme yüzeylerinde ince bir oksit tabakasının oluşumu ve kesme yüzeyinde derin izlerin oluşumu bu yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır.

3.6.3 Laser ile ergiterek kesme

Ergiterek Kesme Yönteminde, laser ışını malzeme üzerine odaklanır ve malzeme ergitilir. Ergitilen malzeme ilave gaz püskürtülerek ortamdan uzaklaştırılır. İlave gaz olarak çoğu zaman inert azot gazı (N_2) veya argon gazı kullanılmaktadır. Bu yöntemle amorf davranış sergileyen cam ve plastikler ile metaller kesilmektedir.

Ergiterek kesme işleminde;

- Malzeme buharlaşma fazına geçmeden ortamdaki uzaklaştırılmalıdır.
- Soy gazların kullanımı kesme yüzeyinde oksidasyonu önlemektedir.
- Kesme hızı yakarak kesmeye göre düşük, süblimleştirerek kesmeye göre yüksektir.
- Metallerin alaşımlandırılmış olmasından bağımsız olarak, bütün metallerin bu yöntemle kesilmesi mümkündür.

3.6.4 Laser ile metalik olmayan malzemelerin kesimi

Birçok metalik olmayan malzemeler direk olarak malzemenin buharlaştırılması yoluyla kesilmektedir. Bu tür malzemelerin kesimi için CO₂ laseri en çok kullanılan laser tipidir. Organik malzemelerin 10.6 µm dalga boyundaki laser ışınlarını oldukça yüksek oranda soğurması sebebi ile, organik malzemelerin kesiminde CO₂ laseri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bazı yarı şeffaf malzemelerin kesimi için ise daha düşük dalga boyuna sahip laser ışını gerekmektedir. Bu tür malzemelerin kesiminde Nd:YAG laserleri tercih edilmektedir.

100 W'lık bir sürekli CO₂ laseri birçok organik malzemenin kesimi için yeterli olmaktadır. Kağıt, plastik kumaş, tahta gibi organik ile tebeşir, cam ve seramik gibi inorganik malzemeler yüksek verimlilikle kesilebilmektedir. Bu tür malzemelerin kesiminde CO₂ laserinin kullanılması takım aşınmasının olmayışı, artık malzeme sarfiyatının azalması, kesme kalitesinin yüksekliği (bazı durumlarda), otomasyon kolaylığı, basit fikstür gereksinimi, karmaşık geometriye sahip parçaların kolaylıkla kesilebilmesi yöntemin başlıca avantajlarından. Laser ışını bilgisayar kontrolü sayesinde tüm yüzeyi tarayabildiği için karmaşık şekle sahip parçaların kesimi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede yeni bir dizayna ait ilk parçalar kalıp yatırımı olmadan ve zamandan tasarruf sağlayarak ekonomik bir şekilde üretilmektedir. Buna ek olarak kumaş, halı ve kağıt gibi malzemelerin mekanik yolla kesimine göre daha ekonomik olarak laser kesim ile şekillendirilebilmektedir.

Laser parçaların kesiminde kullanılan fikstürlerin maliyetlerinin düşük oluşu oldukça büyük ekonomi ve zaman faydası sağlamaktadır. Düzlem şeklindeki kağıt, kumaş

gibi malzemeler vakum yoluyla sabitlenebildiğinden ayrıca bir fikstür tasarımına ihtiyaç duyulmaksızın birçok parçanın üretilmesine imkan sağlamaktadır.

Laser ile plastik malzemelerin kesimi sık kullanılan bir yöntemdir. Kesim parametrelerine ve malzemenin bileşimine bağlı olarak mükemmel kesim yüzeyleri elde edilebilmektedir. Çizelge 3.7’de yaygın olarak kullanılan bazı plastik türlerin laser kesim ile oluşan kesme yüzey kalitesinin durumu verilmiştir.

Çizelge 3.7 : Yaygın olarak kullanılan bazı plastik malzemelerin laser ile kesiminde oluşan yüzey kaliteleri [40].

Kenar Kalitesi Yüksek Plastikler	Kenar Rengi Değişen Plastikler	Kenarları Yanmış Görünümde Olan Plastikler
Akrilik	Selüloz	ABS
Polietilen	Floropolimerler	Epoksi
Polipropilen	Nylon	Fenolik
Polistiren	Polyerter	Polikarbon
-	Silikon	Polyamid
-	Poliüretan	Polivinil Klorid

Birçok plastik malzeme laser kesim metoduyla oldukça iyi bir şekilde kesilirken, kesme yüzeylerinde renk atması veya yanık görünüm oluşabilmektedir. Özellikle termoset malzemelerin laser ile kesimi oldukça zordur. Plastiklerin laser ile kesiminde iyi sonuç alabilmek için yüksek güç yoğunluğuna sahip laser ışını, yüksek laser ışın kalitesi ve yüksek soğurma oranına ihtiyaç vardır.

Çizelge 3.8’de bazı metalik olmayan malzemelerin CO₂ laseri ile kesimine ait parametrelerden örnekler verilmiştir. Buradaki değerler incelendiğinde laser kesim metoduyla ulaşılan kesim hızlarının birçok sektör için tatmin edici olduğu ortaya çıkmaktadır. Bununla ilgili bir örnek vermek gerekirse, kumaş kesim sisteminde bulunan 2 eksenli 350W’lık sürekli CO₂ laseri ve bir bilgisayar ile kontrol edilmektedir. Sistem üzerinde kumaşlar vakum yoluyla sabitlenmekte ve tam otomatik olarak çalışmaktadır. Bu sistem 1000 mm/s gibi yüksek kesim hızlarında kesim yapabilmektedir. Bu yüksek kesim hızlarıyla birim maliyetler düşürülmektedir.

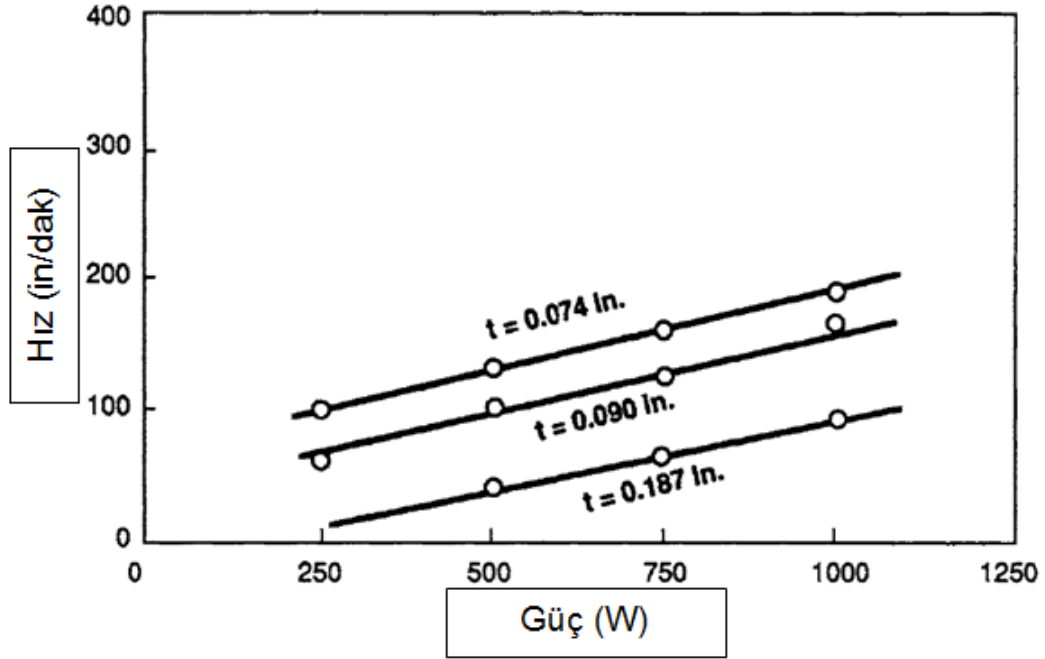
Çizelge 3.8 : Yaygın olarak laser kesim metodunun uygulandığı malzemelere ait parametreler [41].

Malzeme	Kalınlık (in)	Laser Gücü(W)	Hız (in/dak)	Gaz Desteği
Kalsiyum Oksit Cam	0.08	350	30	Hava
Kuartz	0.125	500	29	Belirtilmemiş
Cam	0.125	5000	180	Gerekli
Fayans	0.25	850	19	Gerekli
Alümina Seramik	0.024	250	28	Hava
Playvud	0.19	350	209	Hava
Playvud	0.25	850	213	Gerekli
Elyaf levhası	0.15	300	36	Hava
Elyaf levhası	0.19	850	180	Gerekli
Sentetik Tebeşir	0.1	600	189	Gereksiz
Elyaf levhası	1	8000	60	Gereksiz
Elyaf levhası	0.75	200	12	Hava
Elyaf levhası	0.71	500	28	Gereksiz
Cam	0.008	350	31	Hava
Cam	0.375	20000	60	Gereksiz
Boron Epoksi Komp.	0.32	15000	65	Gereksiz
Fiberglas Epoksi Komp.	0.5	20000	180	Gereksiz
Akrilik Levha	0.04	50	67	Nitrojen
Akrilik Levha	0.22	50	12	Nitrojen
Pleksiglas	0.2	500	110	Gereksiz
Pleksiglas	0.8	500	14	Gereksiz
Grafit Epoksi Kumaş	0.002	400	90	Belirtilmemiş
Kevlar Epoksi	0.093	300	212	Belirtilmemiş

3.6.5 Laser ile metalik malzemelerin kesimi

Metallerin laser ile kesimi için gereken güç metal olmayan malzemelerin kesimi için gereken güçten çok daha fazladır. Metallerin yüksek ısı iletkenlikleri ve yüksek yüzey yansıtıcılık özelliklerinin olması daha fazla güç kullanımına sebep olmaktadır. Yüksek güç ihtiyacı sebebiyle metallerin laser ile kesiminde ağırlıklı olarak CO₂ laserleri kullanılmaktadır.

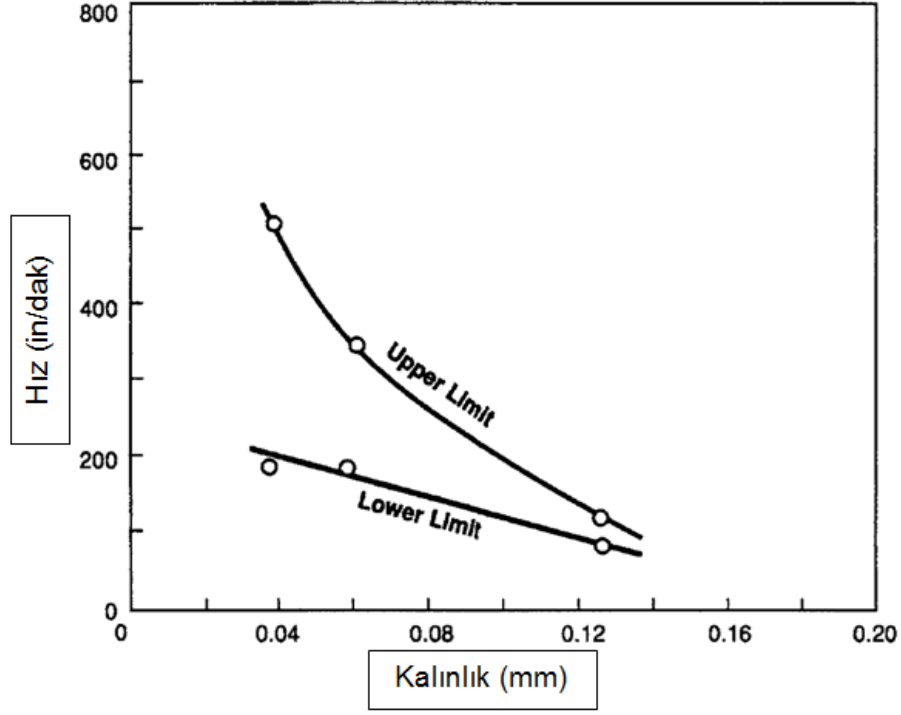
Yüksek güç ihtiyacının daha düşük enerji ile sağlanabilmesi için birçok metalin laser kesiminde oksijen gazı kullanılmaktadır. Kesme esnasında oksijen metali yakarak egzotermik bir reaksiyon oluşturmakta ve ısı açığa çıkmaktadır. Oluşan egzotermik reaksiyon kesim için gerekli olan gücün % 40'ını sağlayabilmektedir. Açığa çıkan bu enerjiden faydalanılarak düşük kalınlığa sahip metaller bir kaç yüz watlık CO₂ laseri ile kesilebilmektedir.



Şekil 3.14 : Düşük karbonlu çeliğin farklı kalınlıkları için kesme hızı ve kesme gücü fonksiyonu [42].

Şekil 3.14'te farklı kalınlıklardaki düşük karbonlu çeliğin CO₂ laseri ile kesiminde; kesme hızı ve gücü parametrelerinin fonksiyonel olarak birbiri ile ilişkisi verilmiştir. Şekil 3.14'te de görüldüğü üzere bir kaç yüz watlık bir laserin hızı dahi endüstriyel talepleri karşılamaya yetecek düzeyde çözüm üretmektedir.

Oksijen eşliğinde yakarak laser kesim yönteminde sabit bir güç için bir minimum kesme hızı ve bir de maksimum kesme hızı mevcuttur. Şekil 3.15'te 1 kW'lık CO₂ laserinin düşük karbonlu çeliğin kesimindeki minimum ve maksimum kesim hızının kalınlığa bağlı değişimi verilmiştir. Kesim hızının alt limit değeri; bu hızın altında malzemenin yakılma olayının gerçekleştirilemediği değerdir. Üst limit ise hızın çok yüksek olduğu, yanmanın tam olarak gerçekleşemediği limit çizgisini belirlemektedir.

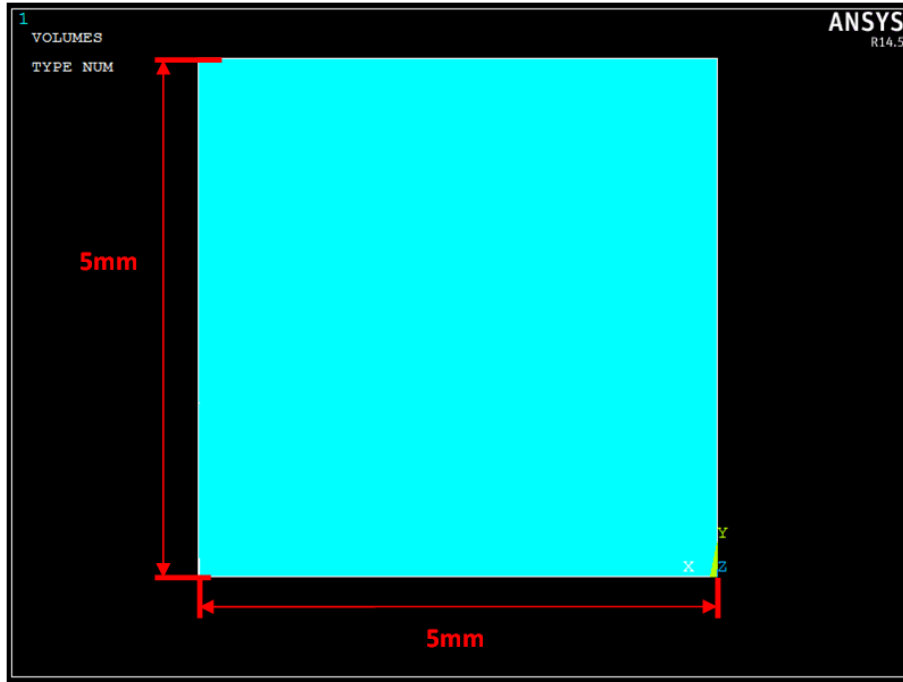


Şekil 3.15 : 1 kW'lık CO₂ laserinin düşük karbonlu çeliğin kesimindeki minimum ve maksimum kesim hızının kalınlığa bağlı değişimi [43].

4. LASER KESİM PARAMETRELERİNİN ETKİSİNİN SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

4.1 Parametrelerin Belirlenmesi ve Geometri

Tez kapsamında lazer ile kesme işlemi üç boyutlu olarak modellenmiş ve kesme hızı, güç yoğunluğu, kalınlık ve malzeme gibi parametrelerin değiştirilmesi durumunda kesme işleminin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Parametrelerin değişiminin sonuca etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için her bir adımda sadece bir değişken değiştirilerek, analiz sayısı artırılmış ancak mukayesenin daha doğru sonuçlar ile yapılması sağlanmıştır. Sonlu elemanlar paket programı olarak Ansys APDL - R14.5 kullanılmıştır.

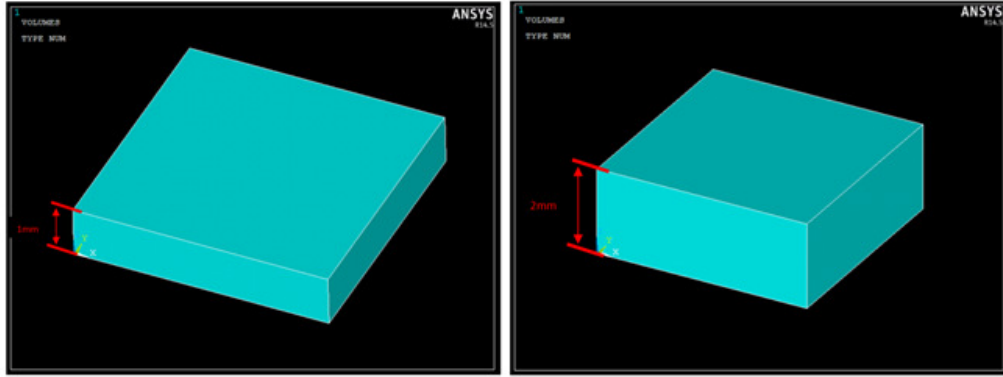


Şekil 4.1 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın geometrisi ve ölçüleri.

Geometri olarak 10mm x 5mm boyutlarında bir blok alınmıştır. Blok üzerinde gerçekleşecek termal olaylar lazer kesimin hareket eksenine göre simetrik

olacağından, bilgisayarın kapasitesi dâhilinde daha yoğun meshler atabilmek ve hesaplama süresinin azaltılmasının sağlanabilmesi için blok ikiye bölünmüştür. Analizlerin yapıldığı bloğun ölçüleri 5mm x 5mm olarak şekil 4.1’de verilmektedir.

Parça kalınlığının laser ile kesme işlemine olan etkisinin belirlenebilmesi için kalınlık bir parametre olarak atanmış ve hesaplamalarda 1 mm ve 2 mm seçilmiştir. Seçilen kalınlık değerlerine ait geometriler şekil 4.2’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın et kalınlıkları.

Bir diğer parametre değeri olarak ise hız seçilmiştir. Hız tanımlanırken, parça sabit kabul edilmiş ve ısıнын tatbik edileceği noktalar değiştirilerek hareket simüle edilmiştir. Seçilen mesh düğümleri arasındaki mesafe bilindiğinden; düğüm noktasına ısıнын uygulanma süresi değiştirilerek bu bölgeden geçiş süresi hesaplanmıştır.

Düğümmler arası mesafe 0,1 mm olduğundan 1 m/dak’lık hız için;

$$V_L = \frac{x_L}{t} \quad (4.1)$$

Tatbik süresi= 0,006 s olarak alınmıştır.

Aynı hesap 2 m/dak’lık hız içi tekrarlandığında tatbik süresi 0,003 s olmaktadır. ısıнын tatbik edileceği düğüm noktaları mesh atma işlemi sonrasında, belirlenerek numaraları not edilmiş ve bu numaralara sırası ile ısı tatbik edilmiştir.

Kesme gücü parametresi 1000 W ve 2000 W olmak üzere iki farklı şekilde ayrı ayrı modellenmiş ve çözülmüştür.

Malzeme değişkeni olarak ise çelik (St-37), paslanmaz çelik (AISI 304), alüminyum (Al-2024) seçilmiştir. Bu malzemelerin kullanılan malzeme özellikleri çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4.1 : Analizlerde kullanılan malzemelerin yoğunluk, ısı iletim kat sayısı, özgül ısı ve ergime sıcaklıkları.

Özellik	Çelik	Paslanmaz Çelik	Alüminyum
Yoğunluk	7,85 kg/cm ³	8 kg/ cm ³	2,8 kg/ cm ³
Isıl İletim Katsayısı	40 W/m*K	16,2 W/m*K	140 W/m*K
Özgül Isı	460 J/kg*K	500 J/kg*K	800 J/kg*K
Ergime Sıcaklığı	1780 K	1728 K	909 K

Laser kesim işlemini sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yaparken kullanılan parametreler ve bu parametreler için seçilen analiz değerlerinin özet hali çizelge 4.2’de verilmektedir.

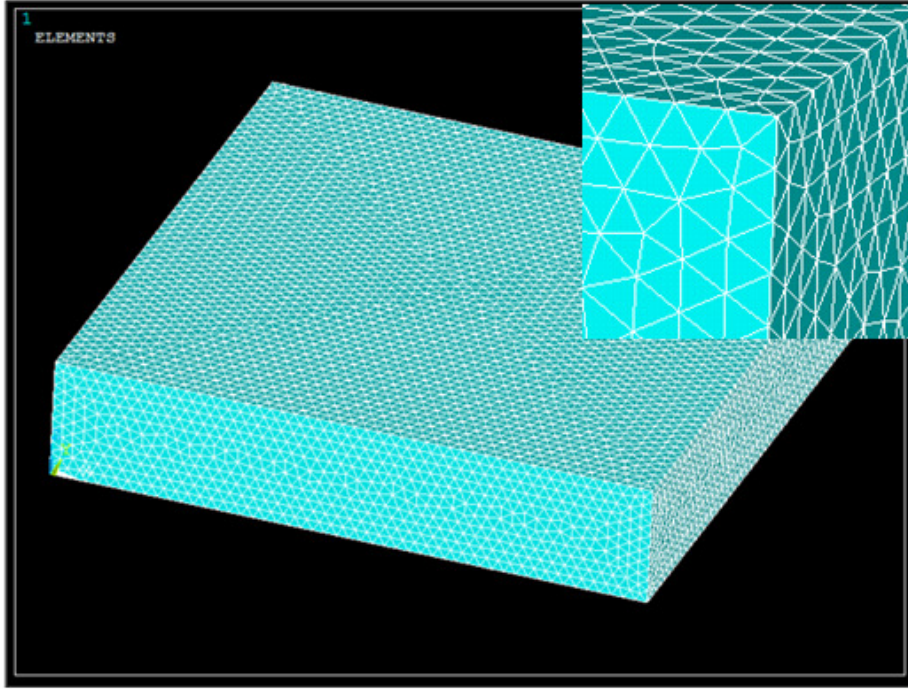
Çizelge 4.2 : Analizlerde kullanılan parametreler.

Laser Kesim Parametreleri	Kalınlık	1 mm 2 mm
	Hız	1 m/dak 2 m/dak
	Kesim	1000W
	Gücü	2000W
	Malzeme	Çelik (St-37) Alüminyum (Al-2024) Paslanmaz Çelik (AISI 304)

4.2 Mesh Atılması Ve Modelleme

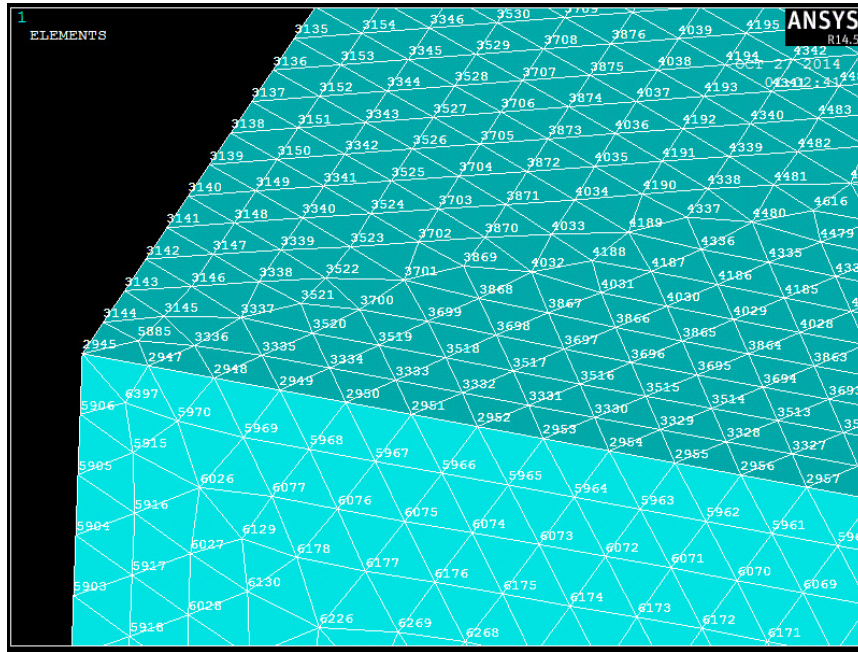
Geometri ve analiz parametreleri belirlendikten sonra analizin yapılacağı mod seçilmiş ve ardından mesh atılmıştır. Yapılacak olan analiz tamamen ısı tatbiki, iletimi ve ergime çerçevesinde gelişeceği için analizler termal mod kullanılarak yapılmıştır.

Atılacak olan mesh tipi termal moda uygun olan SOLID-278 seçilmiştir. Mesh boyutu 0,1 mm alınmış olup tüm hacme aynı boyutta mesh atılmıştır ve toplamda 186470 eleman (1mm et kalınlığındaki geometri için) oluşturulmuştur. Şekil 4.3’te geometrinin mesh atılmış hali görünmektedir.



Şekil 4.3 : Sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılacak parçanın meshlenmesi.

Isının tatbik edileceği noktaların belirlenmesi için mesh düğüm noktalarının numaraları görünür hale getirilmiş ve ısı uygulanacak noktaların numaraları not edilmiştir. Şekil 4.4’te mesh düğüm noktalarının numaralandırılması gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Mesh düğüm noktalarının numaralandırılması.

Not edilen düğüm noktalarına hıza bağlı olarak 0,003 s veya 0,006 s süre ile 1000 W’lık veya 2000 W’lık ısı gönderilmiştir. Gönderilen ısı sebebi ile ergime sıcaklığını geçen meshler “KILLMESH” komutu ile silinerek ergime simüle edilmiştir.

Yapılan analizler çizelge 4.3’de özet olarak verilmektedir.

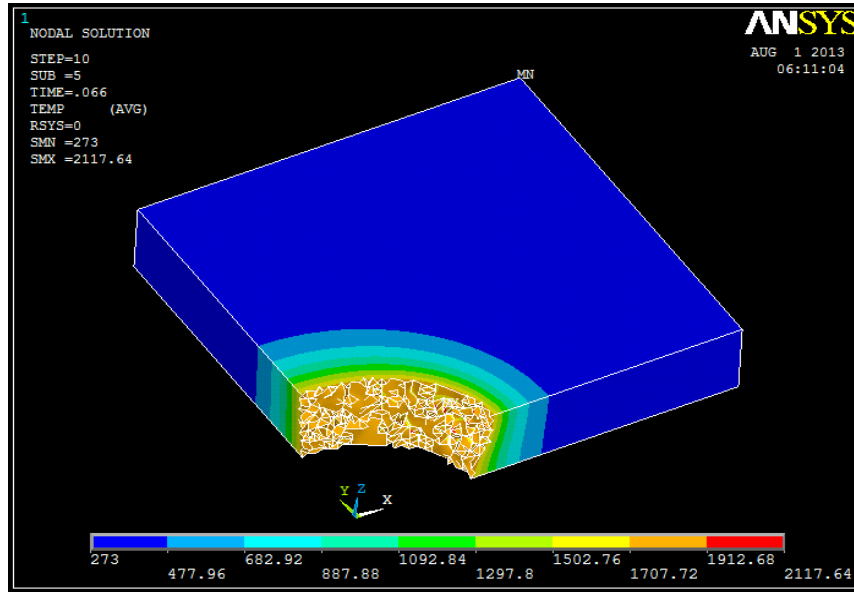
Çizelge 4.3 : Analizlerde kullanılan parametreler.

No	Kalınlık (mm)	Hız (m/dak)	Güç (W)	Malzeme		
				St37	AISI 304	Al 2024
1	1	1	1000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
2	1	1	2000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
3	1	2	1000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
4	1	2	2000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
5	2	1	1000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
6	2	2	1000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
7	2	1	2000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X
8	2	2	2000	X	-	-
				-	X	-
				-	-	X

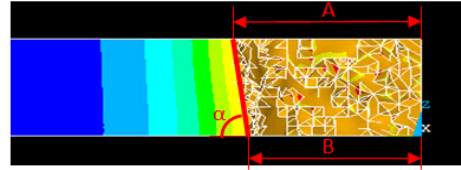
4.3 Laser Kesim Parametrelerinin Sonlu Elemanlar İle Analizlerinin Sonuçları

4.3.1 Analiz 1-2-3

Yapılan ilk 3 analizde 5x5x1 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 1 m/dak ile 1000 W’lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.5’te St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.6’da ise x eksenini doğrultusunda görünüşü verilmektedir.



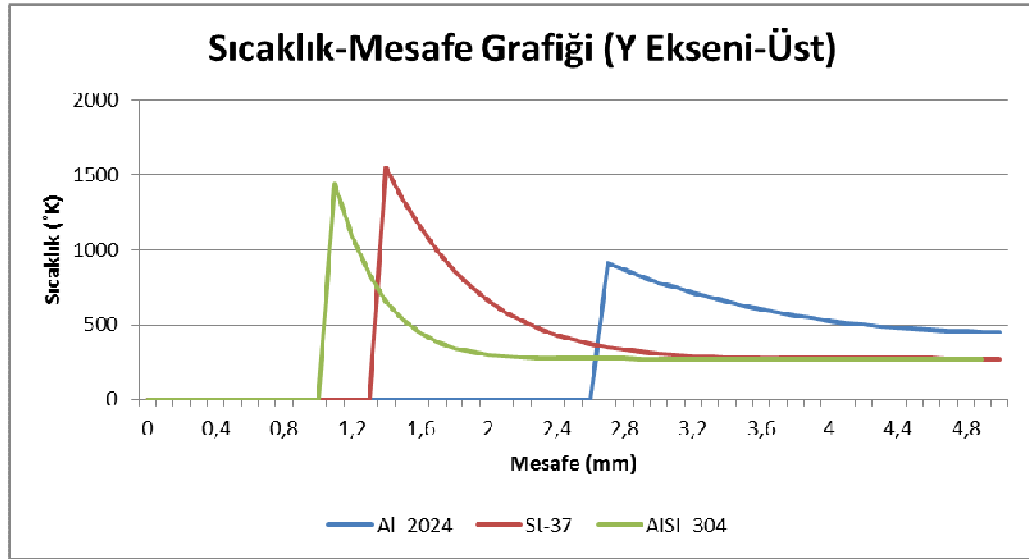
Şekil 4.5 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizın görüntüsü.



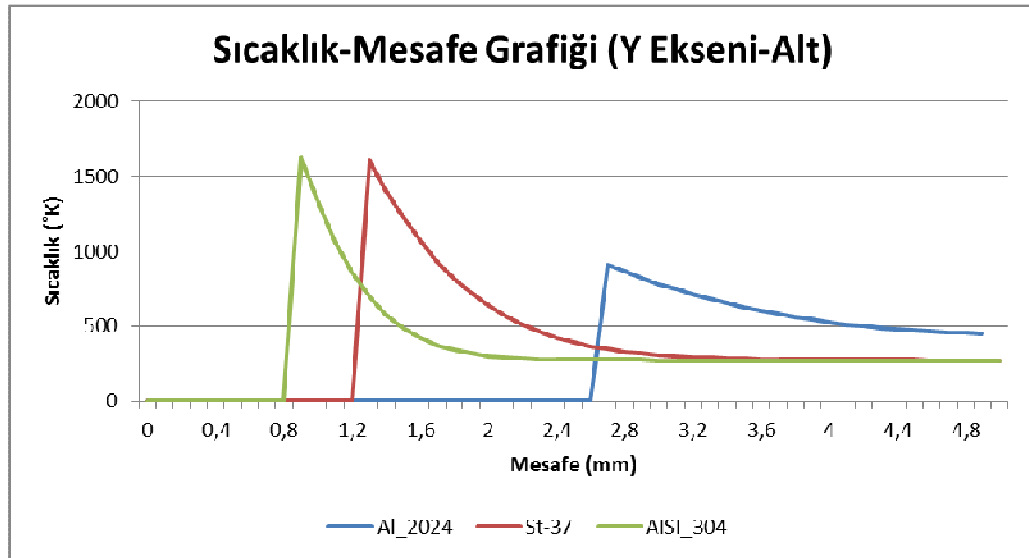
Şekil 4.6 : St-37 malzeme için yapılan analizın x eksenı ekran görüntüsü.

Şekil 4.7'de St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.6'da gösterilen A ölçüsü), şekil 4.8'de ise alt yüzeydeki (şekil 4.6'da gösterilen B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.

Çizelge 4.4'te 1, 2 ve 3 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 için $84,29^\circ$, AISI 304 için $73,30^\circ$, Al 2024 için $84,29^\circ < A < 90^\circ$ açılar hesaplanmıştır.



Şekil 4.7 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



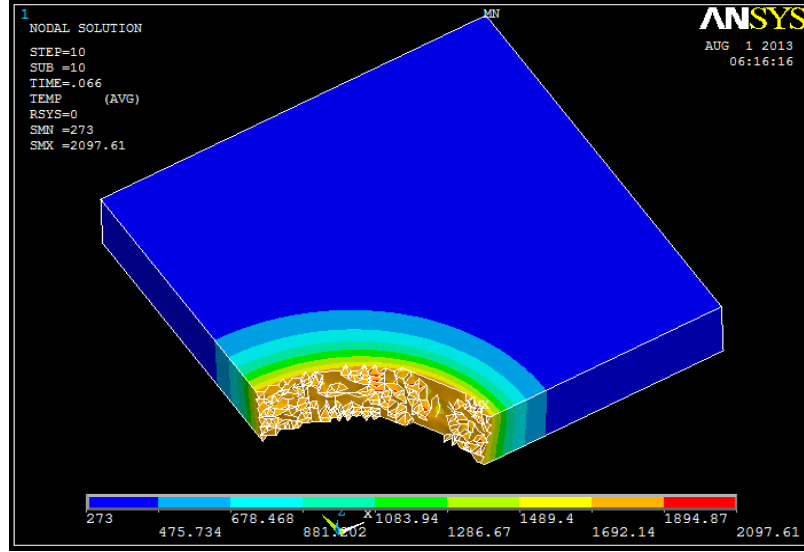
Şekil 4.8 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.4 : 1-2-3 nolu analiz sonuçlarının özeti.

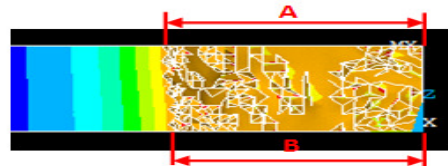
	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	1000	1,4	1,3	84,29°
AISI 304	1	1	1000	1,2	0,9	73,30°
Al 2024	1	1	1000	2,7	2,7	84,29° < A < 90°

4.3.2 Analiz 4-5-6

Yapılan 4, 5 ve 6 nolu analizlerde 5x5x1 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 1 m/dak ile 2000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.9'da St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.10'da ise x eksenini doğrultusunda görünüşü verilmektedir.



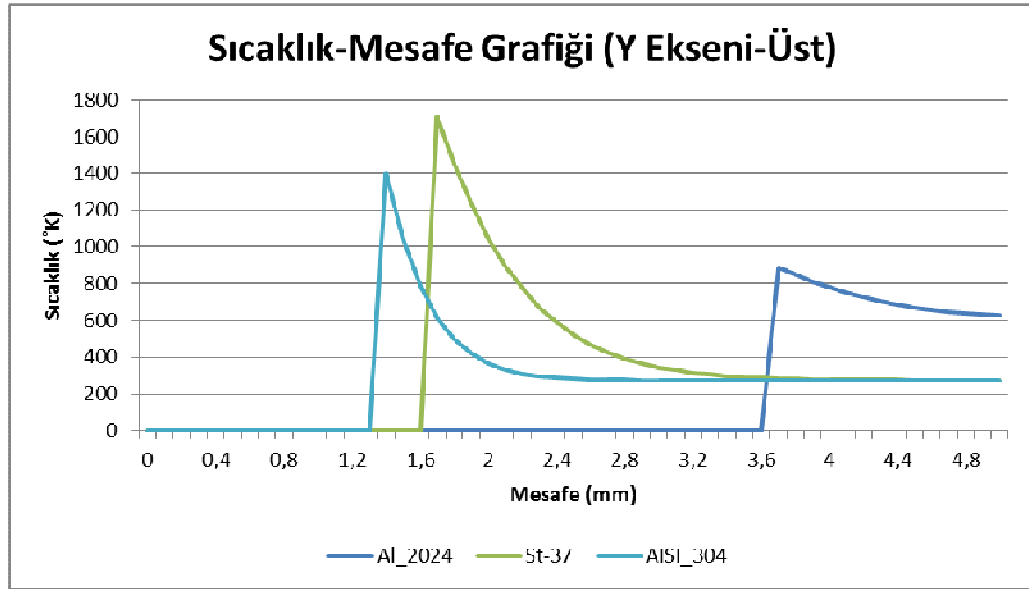
Şekil 4.9 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.



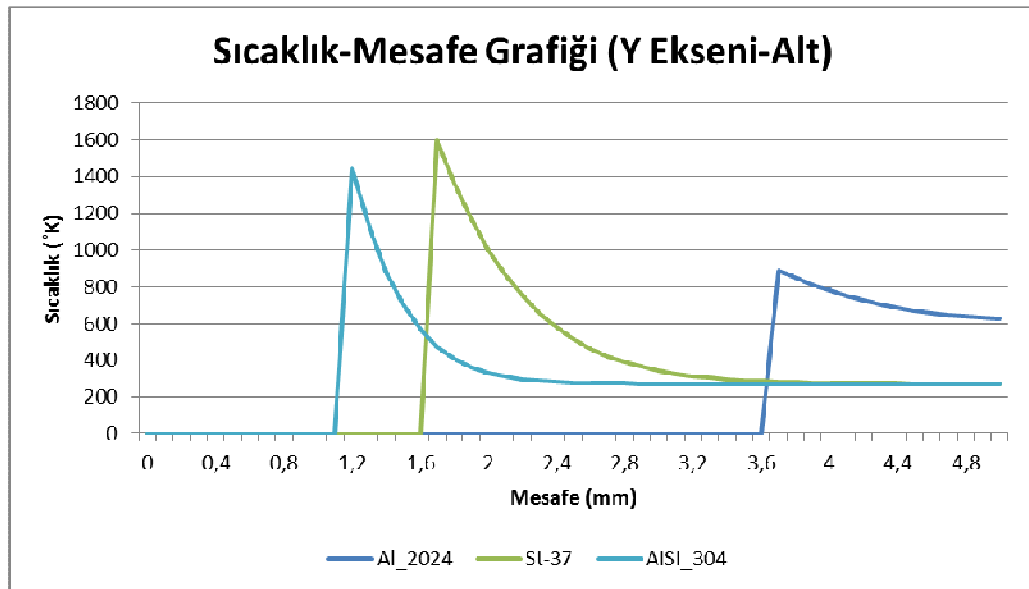
Şekil 4.10 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksenini ekran görüntüsü.

Şekil 4.11'de St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.10'da gösterilen A ölçüsü), şekil 4.12'de ise alt yüzeydeki (şekil 4.10'da gösterilen B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.

Çizelge 4.5'te 4, 5 ve 6 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 için 84,29°, AISI 304 için 78,69°, Al 2024 için $84,29^\circ < A < 90^\circ$ açılar hesaplanmıştır.



Şekil 4.11 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



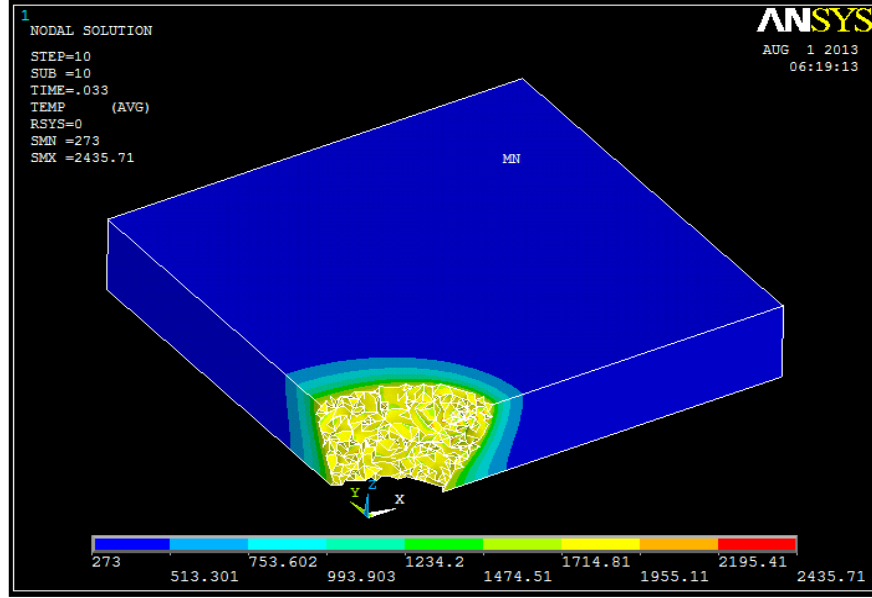
Şekil 4.12 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.5 : 4-5-6 nolu analiz sonuçlarının özeti.

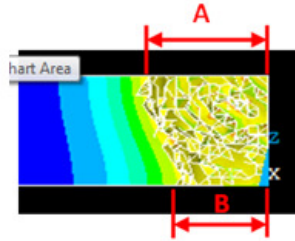
	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	2000	1,8	1,7	84,29°
AISI 304	1	1	2000	1,4	1,2	78,69°
Al 2024	1	1	2000	3,7	3,7	84,29° < A < 90°

4.3.3 Analiz 7-8-9

Yapılan 7, 8 ve 9 nolu analizlerde 5x5x1 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 2 m/dak ile 1000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.13'te St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.14'da ise x eksenini doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

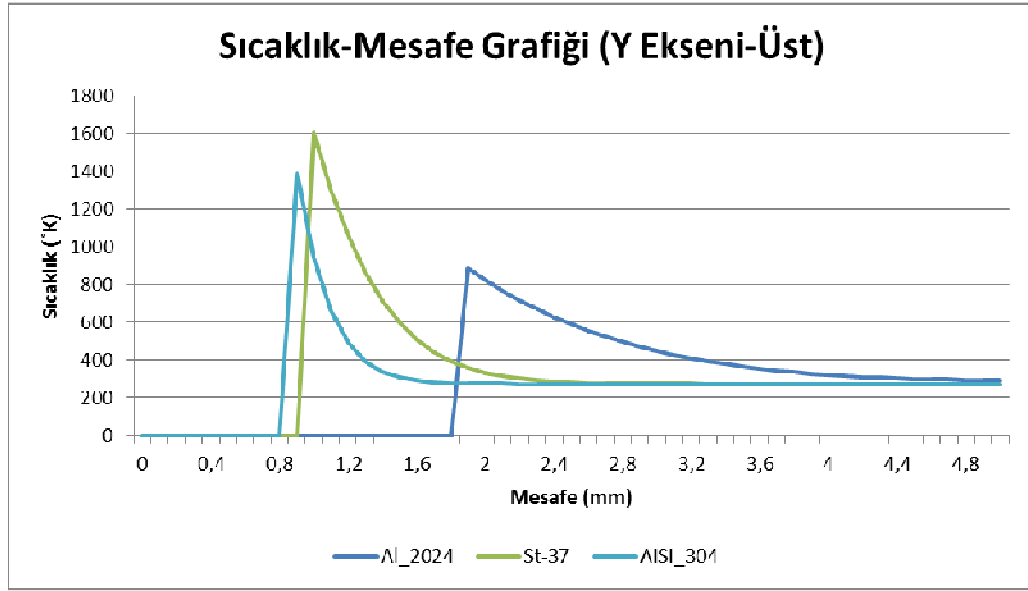


Şekil 4.13 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.

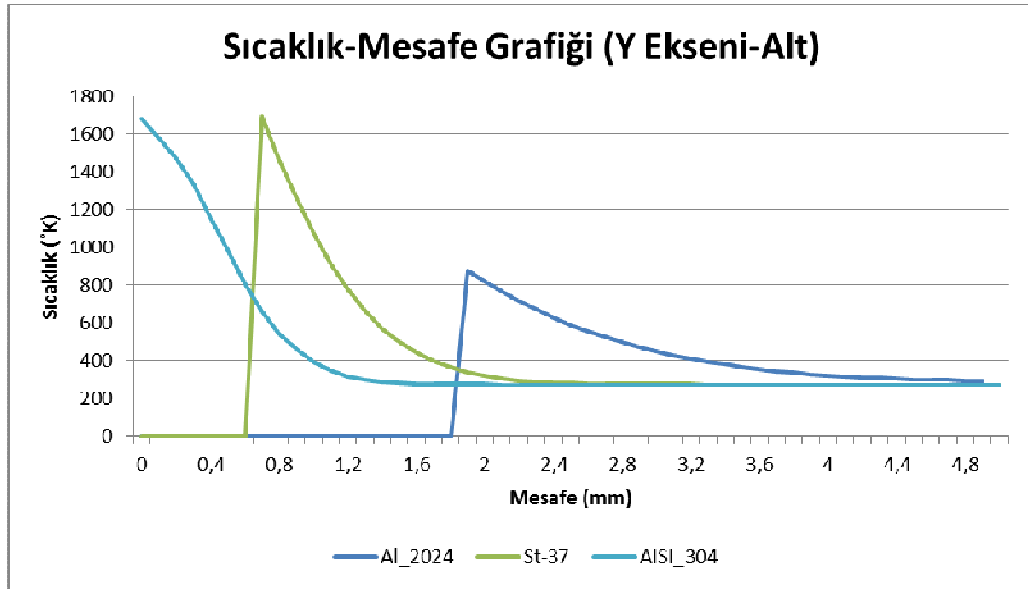


Şekil 4.14 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksenini ekran görüntüsü.

Şekil 4.15'te St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.14'da gösterilen A ölçüsü), şekil 4.16'de ise alt yüzeydeki (şekil 4.14'da gösterilen B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.



Şekil 4.15 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



Şekil 4.16 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

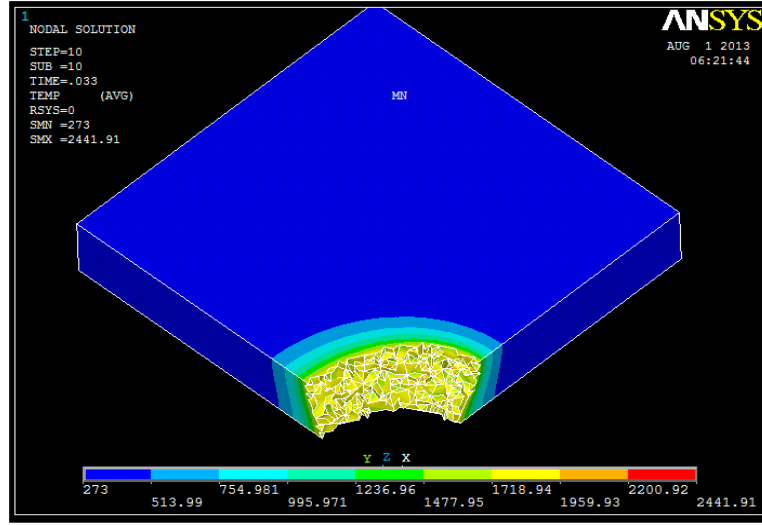
Çizelge 4.6'da 7, 8 ve 9 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 için $73,30^\circ$, Al 2024 için $84,29^\circ < A < 90^\circ$ açılar hesaplanmıştır. AISI 304 için ise kesme işlemi gerçekleşmemiştir.

Çizelge 4.6 : 7-8-9 nolu analiz sonuçlarının özeti.

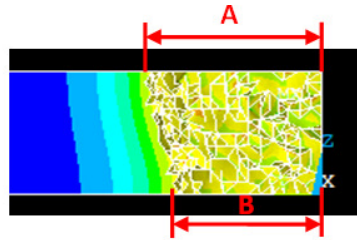
	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	2	1000	1	0,7	73,30°
AISI 304	1	2	1000	0,9	0	-
Al 2024	1	2	1000	1,9	1,9	84,29°<A<90°

4.3.4 Analiz 10-11-12

Yapılan 10, 11 ve 12 nolu analizlerde 5x5x1 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 2 m/dak ile 2000 W’lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.17’de St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.18’de ise x eksenı doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

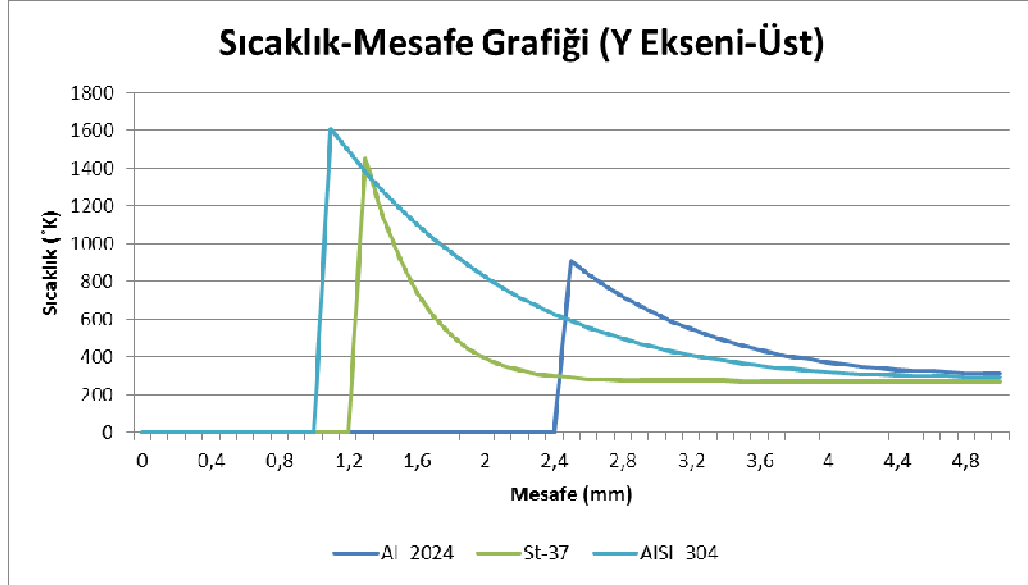


Şekil 4.17 : St-37 malzemenin 1 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 2000W’lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü

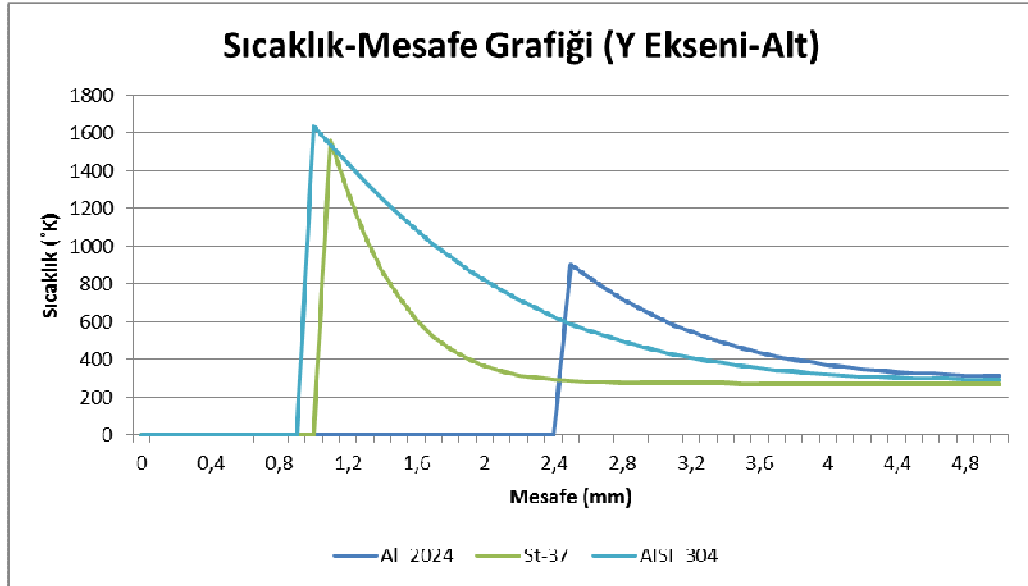


Şekil 4.18 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksenı ekran görüntüsü.

Şekil 4.19’da St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.18’da gösterilen A ölçüsü), şekil 4.20’de ise alt yüzeydeki (şekil 4.18’da gösterilen B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.



Şekil 4.19 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



Şekil 4.20 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.7’de 10, 11 ve 12 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan

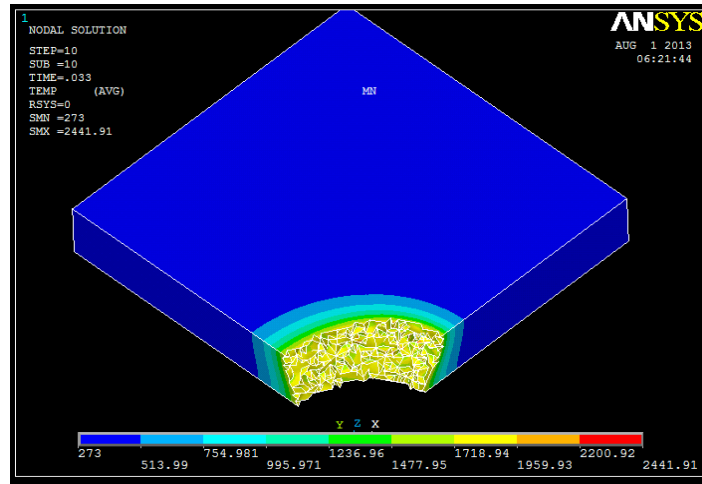
açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 için $78,69^\circ$, AISI 304 için $84,29^\circ$ ve Al 2024 için $84,29^\circ < A < 90^\circ$ açılar hesaplanmıştır.

Çizelge 4.7 : 10-11-12 nolu analiz sonuçlarının özeti.

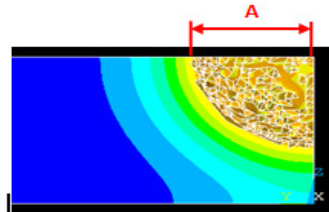
	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A ($^\circ$)
St-37	1	2	2000	1,3	1,1	$78,69^\circ$
AISI 304	1	2	2000	1,1	1	$84,29^\circ$
Al 2024	1	2	2000	2,5	2,5	$84,29^\circ < A < 90^\circ$

4.3.5 Analiz 13-14-15

Yapılan 13, 14 ve 15 nolu analizlerde $5 \times 5 \times 2$ mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 1 m/dak ile 1000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.21'de St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.22'de ise x eksenı doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

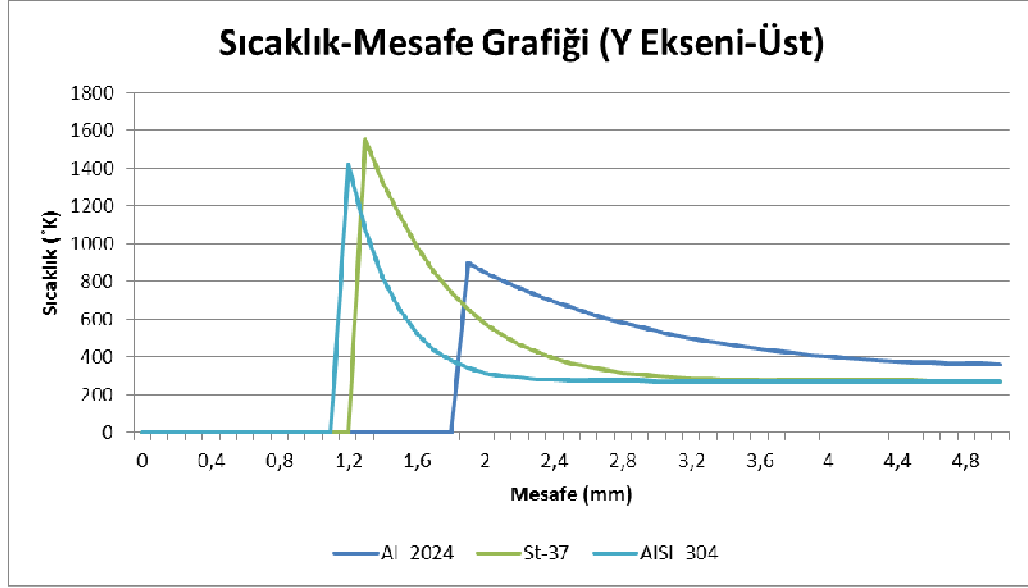


Şekil 4.21 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.

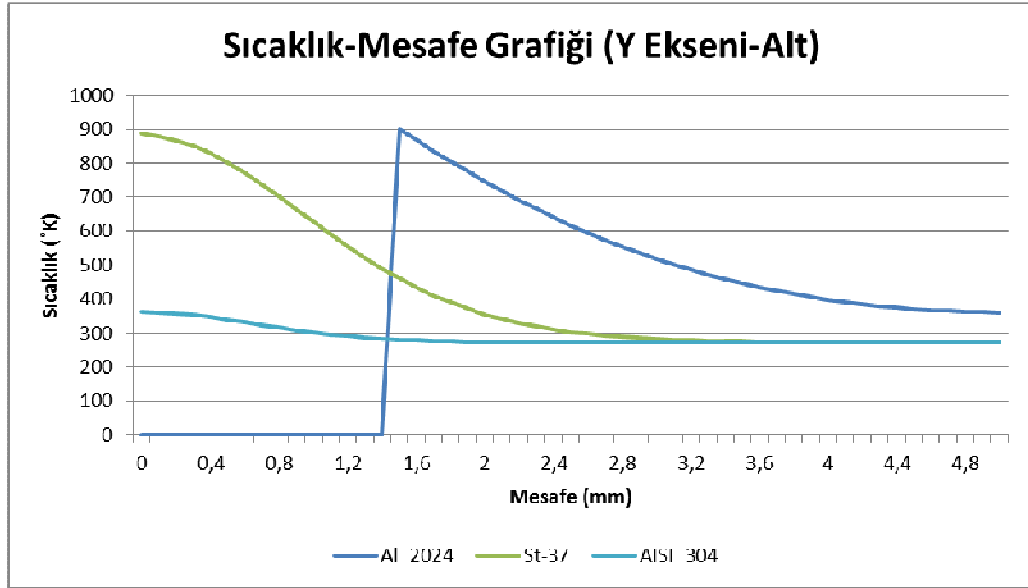


Şekil 4.22 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksenı ekran görüntüsü.

Şekil 4.23'te St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.24'te gösterilen A ölçüsü), şekil 4.24'de ise alt yüzeydeki (B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.



Şekil 4.23 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



Şekil 4.24 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.7'de 13, 14 ve 15 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan

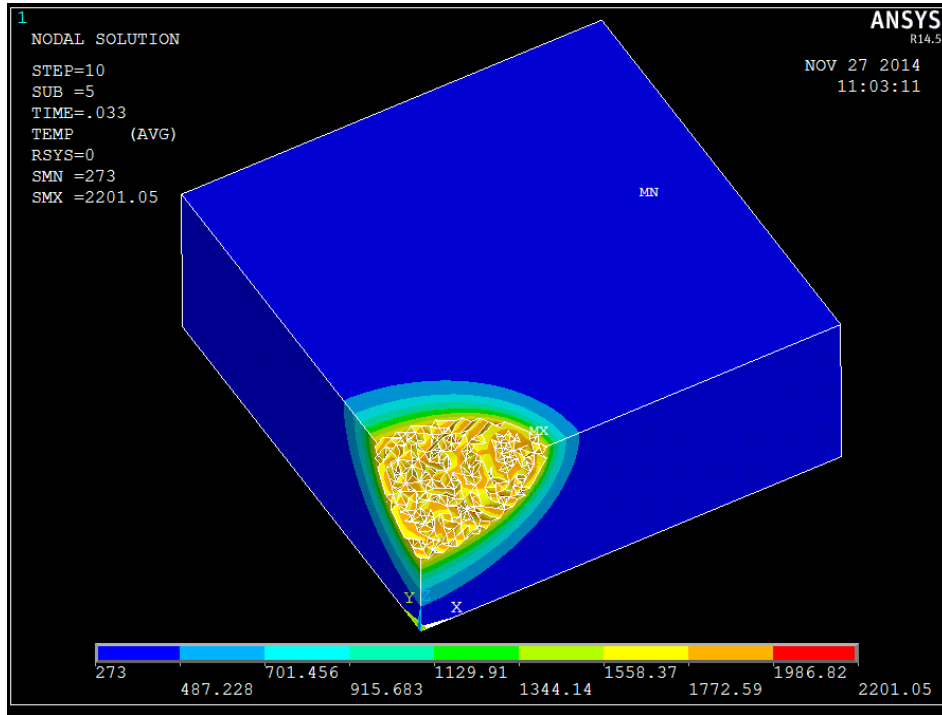
açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 ve AISI 304 için kesme işlemi gerçekleşmezken; Al 2024 için 68,2° açılar hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8 : 13-14-15 nolu analiz sonuçlarının özeti.

	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	2	1	1000	1,3	0	-
AISI 304	2	1	1000	1,2	0	-
Al 2024	2	1	1000	1,9	1,5	68,2°

4.3.6 Analiz 16-17-18

Yapılan 16, 17 ve 18 nolu analizlerde 5x5x2 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 2 m/dak ile 1000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.25'de St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.26'de ise x eksenı doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

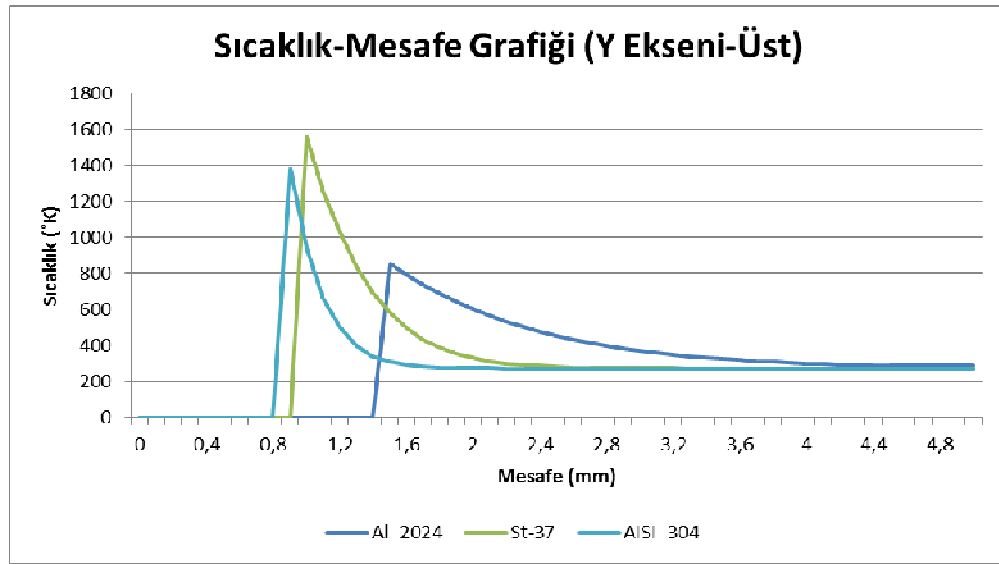


Şekil 4.25 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 1000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.



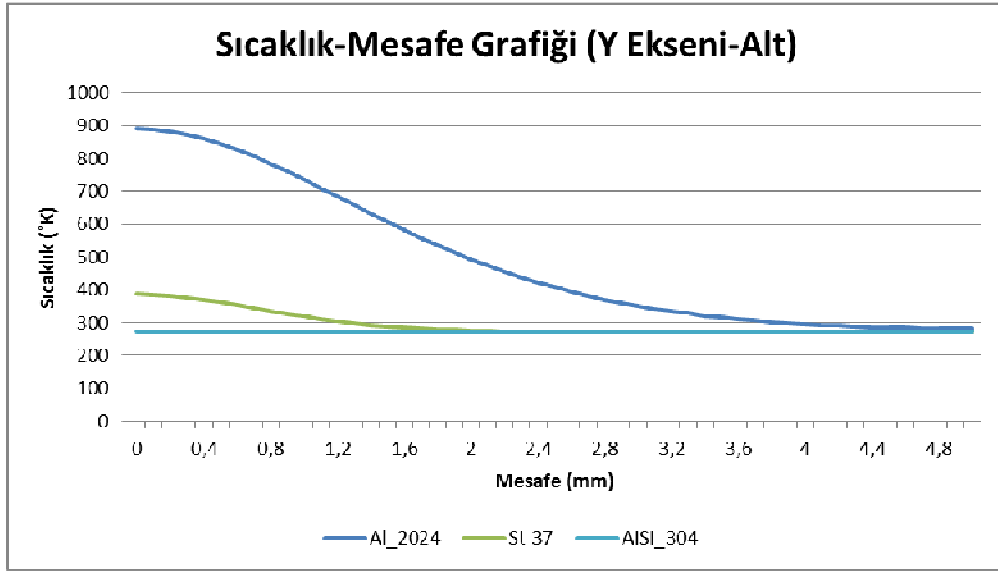
Şekil 4.26 : St-37 malzeme için yapılan analiz x eksen ekran görüntüsü.

Şekil 4.27’de St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.26’da gösterilen A ölçüsü), şekil 4.28’de ise alt yüzeydeki (B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.



Şekil 4.27 : St-37,AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.9’da 16, 17 ve 18 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmak istenmiştir. Ancak St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin hiç birisi için kesme işlemi gerçekleşmemiştir. Malzeme boşaltmanın gerçekleştiği son noktayı referans alarak açı hesaplaması verilerin incelenmesi esnasında karışıklık oluşturmaması için verilmemiştir. Bu analizlerde kullanılan parametrelerin her üç malzemenin kesimi için de uygun olmadığı çizelge 4.9’daki verilerden açık bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 4.28 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

Çizelge 4.9 : 16-17-18 nolu analiz sonuçlarının özeti.

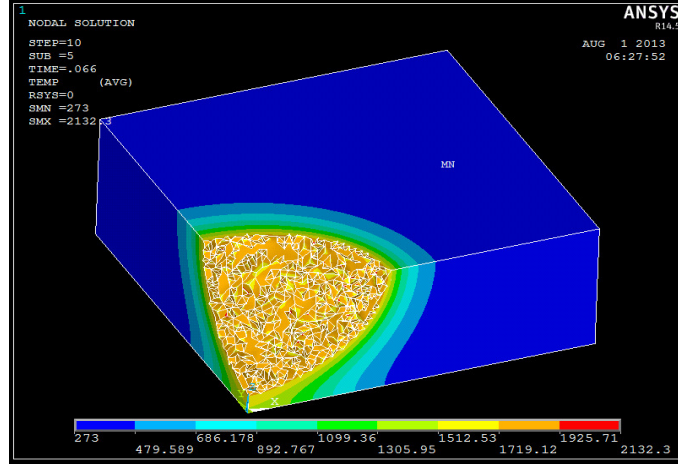
	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	2	2	1000	1	0	-
AISI 304	2	2	1000	0,9	0	-
Al 2024	2	2	1000	1,5	0	-

4.3.7 Analiz 19-20-21

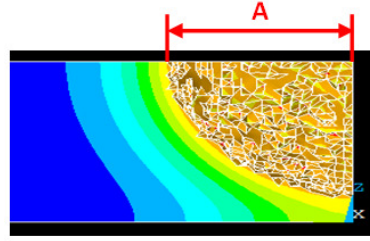
Yapılan 19, 20 ve 21 nolu analizlerde 5x5x2 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 1 m/dak ile 2000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.29'de St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.30'de ise x eksenini doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

Şekil 4.31'de St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.30'te gösterilen A ölçüsü), şekil 4.32'de ise alt yüzeydeki (B ölçüsü) sıcaklık mesafe değişimi verilmektedir.

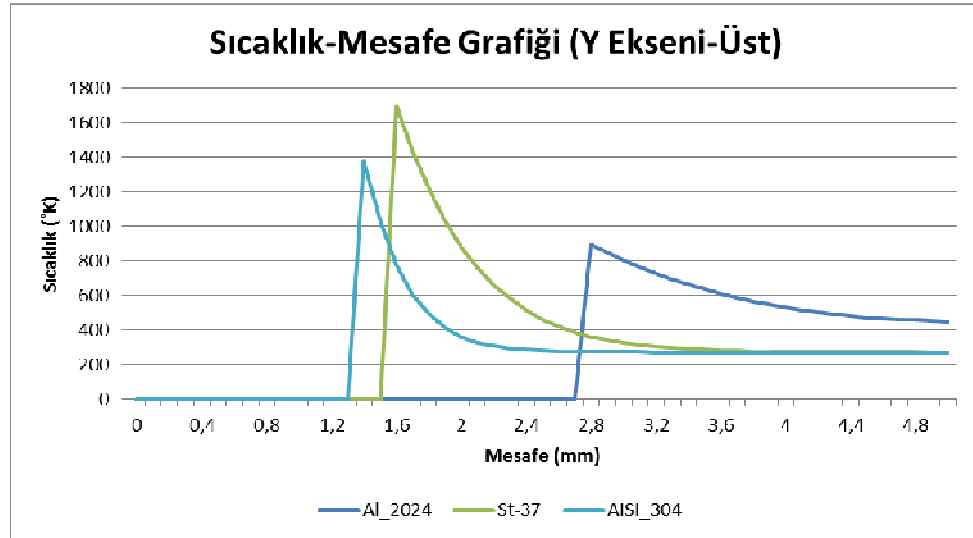
Çizelge 4.7'de 19, 20 ve 21 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 ve AISI 304 için kesme işlemi gerçekleşmezken; Al 2024 için 68,2° açılar hesaplanmıştır.



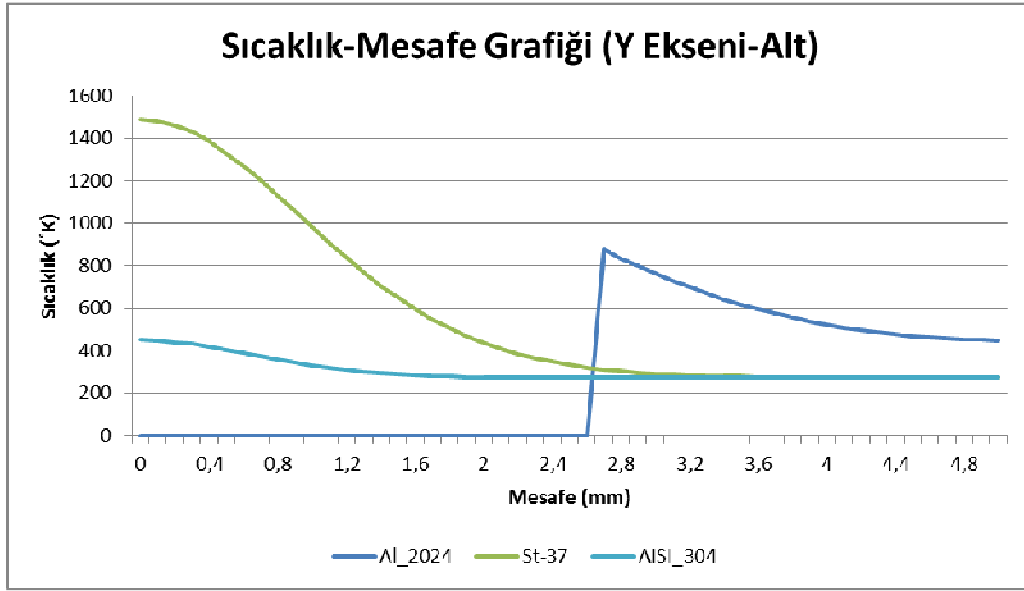
Şekil 4.29 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 1 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizin görüntüsü.



Şekil 4.30 : St-37 malzeme için yapılan analizin x eksenı ekran görüntüsü.



Şekil 4.31 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



Şekil 4.32 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

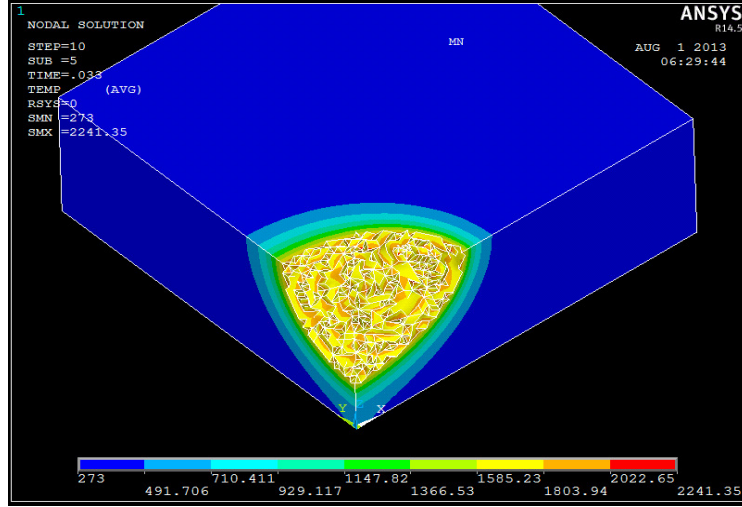
Çizelge 4.10 : 19-20-21 nolu analiz sonuçlarının özeti.

	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	2	1	2000	1,6	0	-
AISI 304	2	1	2000	1,4	0	-
Al 2024	2	1	2000	2,8	2,7	84,29°

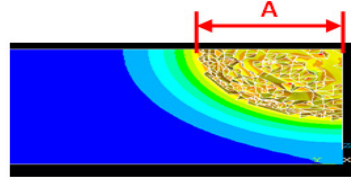
4.3.8 Analiz 22-23-24

Yapılan 22, 23 ve 24 nolu analizlerde 5x5x2 mm ebatlarında bir geometri kullanılmış ve kesme hızı 2 m/dak ile 2000 W'lık güç seçilmiştir. Bu parametreler ile analizler St-37 , AISI 304 ve Al-2024 için ayrı ayrı tekrarlanmıştır. Şekil 4.33'te St-37 malzeme için seçilen parametreler ile yapılan analizin genel ekran görüntüsü, şekil 4.34'te ise x eksenini doğrultusunda görünüşü verilmektedir.

Çizelge 4.7'de 10, 11 ve 12 nolu analizlerin parametreleri ve analiz sonucunda elde edilen A ve B ölçüleri verilmiştir. A ve B ölçülerinden yola çıkarak yüzeyde oluşan açı hesaplanmıştır. Her malzemede farklı açılar oluşup; St-37 ve AISI 304 için kesme işlemi gerçekleşmezken; Al 2024 için 63,44° açılar hesaplanmıştır.

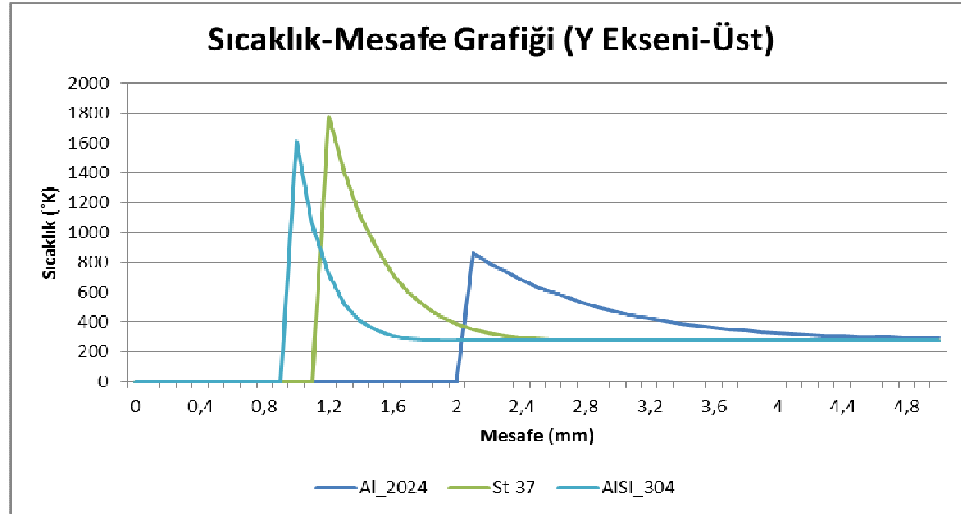


Şekil 4.33 : St-37 malzemenin 2 mm et kalınlığı, 2 m/dak hız ve 2000W'lık güç parametreleri ile yapılan analizın görüntüsü.

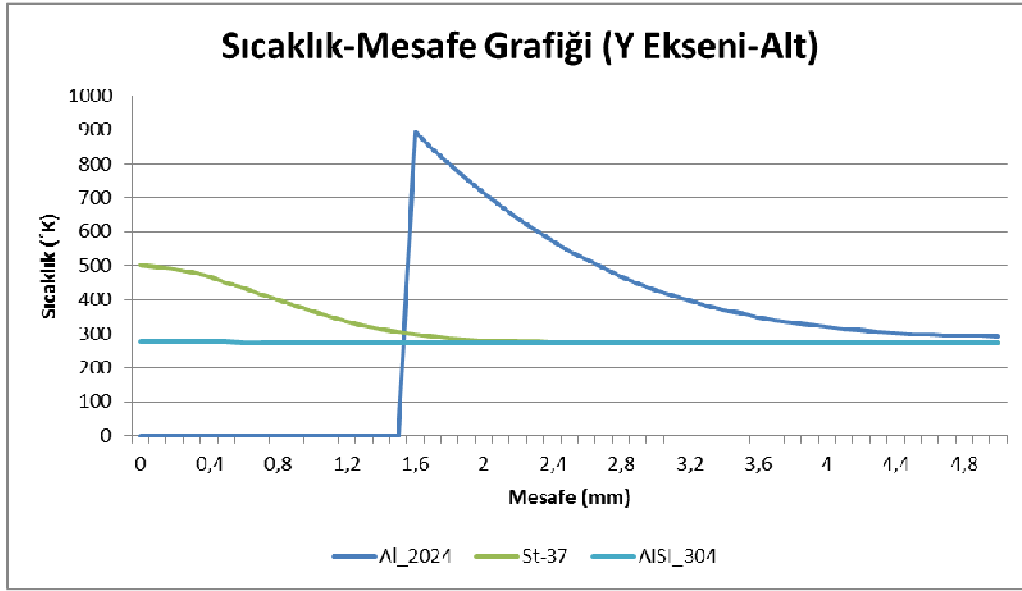


Şekil 4.34 : St-37 malzeme için yapılan analizın x eksenı ekran görüntüsü.

Şekil 4.35'de St-37, AISI 304 ve Al 2024 malzemelerin üst yüzeyindeki (şekil 4.34'te gösterilen A ölçüsü), şekil 4.36'de ise alt yüzeydeki (B ölçüsü) sıcaklık mesafe değışimi verilmektedir.



Şekil 4.35 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin üst yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.



Şekil 4.36 : St-37, AISI 304 ve Al-2024 malzemelerin alt yüzeydeki sıcaklık mesafe dağılımı.

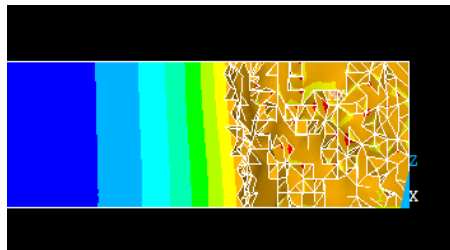
Çizelge 4.11 : 22-23-24 nolu analiz sonuçlarının özeti.

	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	2	2	2000	1,2	0	-
AISI 304	2	2	2000	1	0	-
Al 2024	2	2	2000	2,1	1,6	63,44°

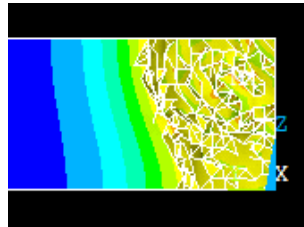
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analiz sonuçları sadece bir parametre değiştirilerek birbiri ile kıyaslandığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Belirtilen başlangıç şartlarına sahip parça için et kalınlığı, kesme gücü ve malzeme sabit alınıp, kesme hızı değiştirildiğinde; kesme hızının yüksek olduğu parçada ITAB daha dar bölgede oluşmaktadır. Ayrıca kesim esnasında parçadan boşaltılan malzeme miktarı da azalmaktadır. Kesme hızı 1m/dak iken parçanın kesme eksenine dik ekseninde oluşan malzeme boşaltma miktarı, parçanın laser ışını tatbik edilen yüzeyinde 1,4 mm iken; laser ışınının çıkış yüzeyinde ise 1,3 mm olarak hesaplanmıştır. Kesme hızının 2 m/dak olduğu durumda ise aynı değerler sırası ile 1mm ve 0,7 mm olmaktadır. Parçanın kesim yüzeylerinde kesme hızının değişken olması sebebi ile parçanın sönmülediği enerji miktarının değişmesi, kesme yüzeyinde oluşan açığı da doğrudan etkilemektedir. Parça yüzeyinde oluşan açılar 1 m/dak hız için $84,29^\circ$ iken, 2 m/dak için ise $73,30^\circ$ olmaktadır. Buradan çıkartılacak sonuç ikinci opsiyon için seçilen parametreler yeterince iyi olmayıp, laser kesimden beklenen hassasiyet ve kaliteyi sağlayamamaktadır. Kesme hızı etkisinin görüntüleri şekil 5.1’de, veriler ise çizelge 5.1’de kıyaslanmaktadır.



Et kalınlığı: 1 mm
Kesme Hızı: 1m/dak
Kesme Gücü: 1000W
Malzeme: St-37



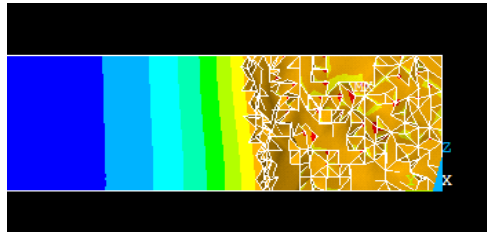
Et kalınlığı: 1 mm
Kesme Hızı: 2m/dak
Kesme Gücü: 1000W
Malzeme: St-37

Şekil 5.1 : Kesme hızı etkisinin analiz görüntüleri.

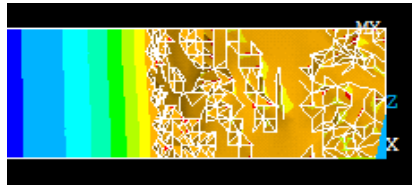
Çizelge 5.1 : Kesme hızının etkisinin kıyaslanması.

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	1000	1,4	1,3	84,29°
St-37	1	2	1000	1	0,7	73,30°

Başlangıç koşulları aynı olan parçalar için et kalınlığı, kesme hızı ve malzeme sabit parametreler olarak alınıp kesme gücü değiştirildiğinde; kesme gücünün yüksek olduğu parça üzerinde ITAB'ın daha geniş olduğu, kesme esnasında boşaltılan malzeme miktarının da daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kesme gücünün 1000 W olduğu durumda, parçanın kesme eksenine dik ekseninde oluşan malzeme boşaltma miktarı, parçanın laser ışını tatbik edilen yüzeyinde 1,4 mm iken; laser ışınının çıkış yüzeyinde ise 1,3 mm olarak hesaplanmıştır. Kesme gücünün 2000 W olduğu durumda ise bu değerler sırası ile 1,8 mm ve 1,7 mm olmaktadır. Kesme yüzeyinde oluşan açı ise her iki durumda da aynıdır. Buradan çıkartılacak sonuç kesme gücünün yeterli olduğu durumda, gücün daha da arttırılması malzeme boşaltma miktarını arttırmaktadır. Alüminyum 2024 ile yapılan analiz sonuçları da göz önüne alındığında parça üzerinde oluşan kesme açısı malzemenin ısıl iletkenlik katsayısının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Kesme gücünün belirli bir seviyeden daha büyük olması durumunda, kesme gücünün daha da arttırılması kesme yüzeyinde oluşan açının azaltılması yönünde olumlu bir etki sağlamamaktadır. Kesme gücü etkisinin görüntüleri şekil 5.2'de, veriler ise çizelge 5.2'de kıyaslanmaktadır.



Et kalınlığı: 1 mm
Kesme Hızı: 1 m/dak
Kesme Gücü: 1000W
Malzeme: St-37



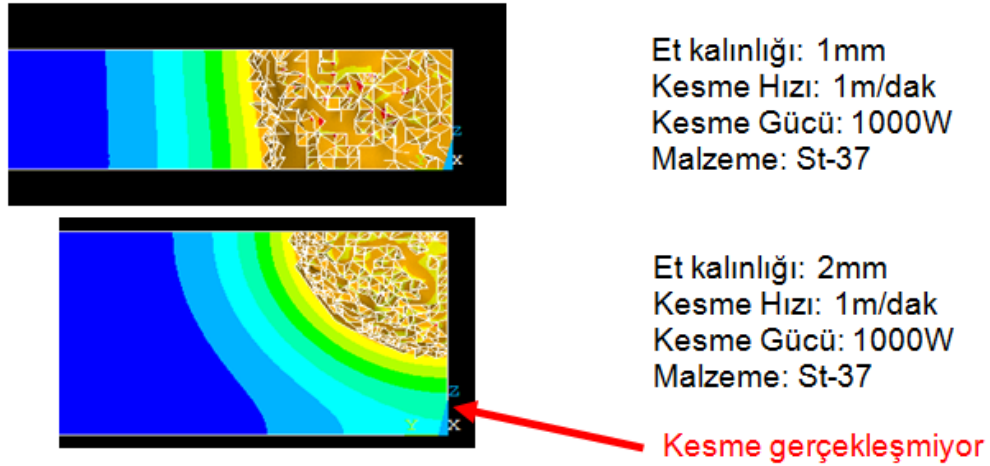
Et kalınlığı: 1 mm
Kesme Hızı: 1 m/dak
Kesme Gücü: 2000W
Malzeme: St-37

Şekil 5.2 : Kesme gücü etkisinin analiz görüntüleri.

Çizelge 5.2 : Kesme gücü etkisinin kıyaslanması.

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	1000	1,4	1,3	84,29°
St-37	1	1	2000	1,8	1,7	84,29°

Başlangıç koşulları aynı olan parçalar için kesme gücü, kesme hızı ve malzeme sabit parametreler olarak alınıp, parçanın et kalınlığı değiştirildiğinde; seçilen güç değeri 1mm kalınlığındaki parçayı kesmek için yeterli gelirken, 2 mm et kalınlığına sahip parça için yeterli olmamıştır. Parça kalınlığı arttığında parçanın kendi içerisinde ısı iletim imkanı da arttığından parçanın kesimi gerçekleştirilememiştir. Kesimin aynı sabit parametrelerle gerçekleşebilmesi için gücün artırılması veya sabit güç için hızın düşürülmesi gerekmektedir. Aynı koşullarda daha yüksek ısı iletkenlik katsayısına ve daha düşük ergime sıcaklığına sahip Al-2024 için ise kesme işlemi 68,2 ° 'lık açı ile gerçekleşebilmektedir. Kalınlık etkisinin görüntüleri şekil 5.3'te, veriler ise çizelge 5.3'te kıyaslanmaktadır.

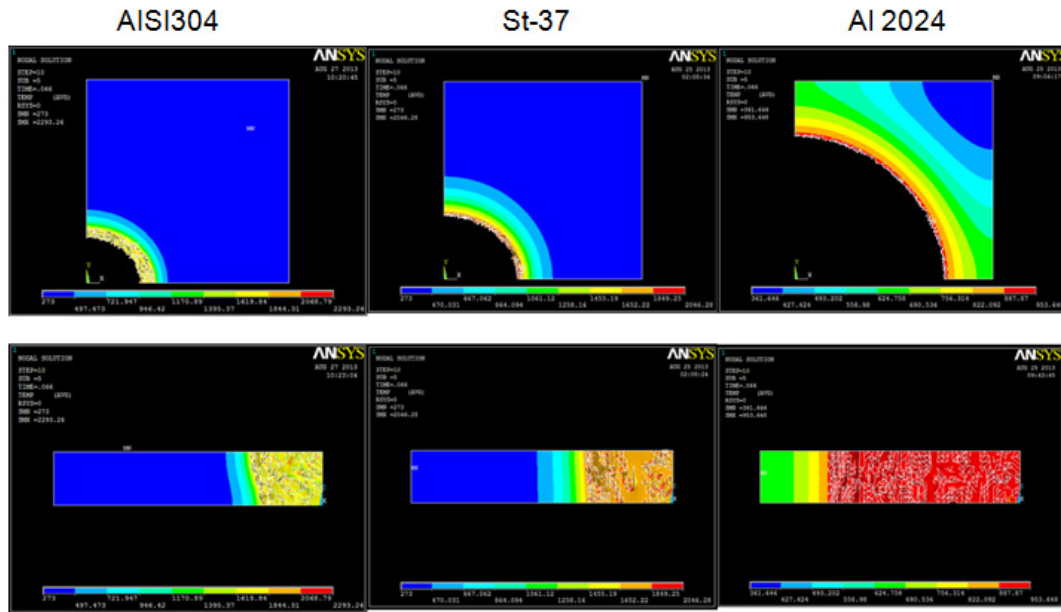


Şekil 5.3 : Kalınlık etkisinin analiz görüntüleri.

Çizelge 5.3 : Kalınlık etkisinin kıyaslanması.

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	1000	1,4	1,3	84,29°
St-37	2	1	1000	1,3	0	-

Analizlerden birisinde de kesme hızı, kesme gücü ve et kalınlığı sabit tutularak, malzeme değiştirilmiştir. Şekil 5.4'te ki analiz sonuçlarına ait ekran görüntüsünden de anlaşılabacağı üzere AISI 304 paslanmaz çeliğin ısı iletim kat sayısı St-37 çeliğe kıyasla daha düşük olduğundan hem ITAB dar bölgede kalmış, hem de boşaltılan malzeme miktarı azdır. Isıl iletim kat sayısının düşük olmasının bir diğer etkisi ise yüzeyde gözlemlenen açı üzerinde gözlemlenmektedir. Bu açıya göre sıralama yapılacak olunursa malzemelerin ısı iletim kat sayılarına göre yapılacak olan sıralama ile aynı sonuç elde edilecektir. Aşağıdaki parametrelere ait açı değerleri AISI 304 için 78,69 °, St-37 için 84,29° ve Al 2024 için 84,29°<A<90° olmaktadır. Aynı şartlardaki kesme işleminde gerek alüminyum 2024'ün ısı iletkenlik kat sayısının yüksek olması gerekse ergime sıcaklığının diğer iki malzemeye göre daha düşük olması sebebi ile boşaltılan malzeme miktarı diğer malzemelere oranla daha fazla olmuştur. Yüksek ısı iletkenlik kat sayısının bir diğer etkisi ise geniş ITAB oluşturması olarak gözlemlenmiştir. Çizelge 5.4'te malzeme parametresine bağlı olarak yapılan analiz sonuçları kıyaslanmaktadır.

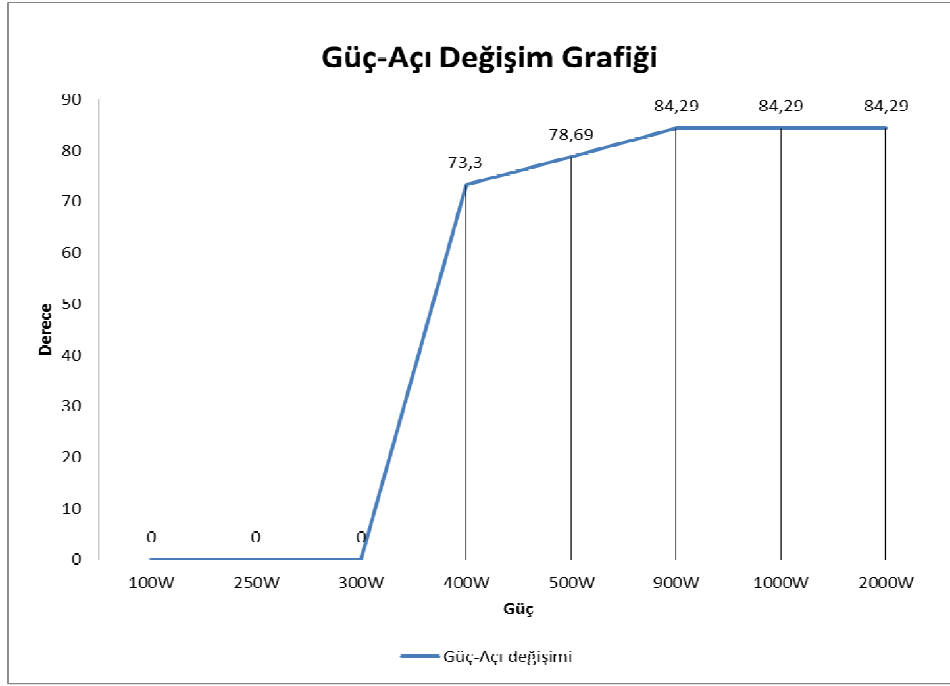


Şekil 5.4 : Malzeme değişikliği etkisinin analiz görüntüleri.

Çizelge 5.4 : Malzeme değişikliği etkisinin kıyaslanması.

	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Gücü (W)	A (mm)	B (mm)	A (°)
St-37	1	1	2000	1,8	1,7	84,29°
AISI 304	1	1	2000	1,4	1,2	78,69°
Al 2024	1	1	2000	3,7	3,7	84,29°<A<90°

Kesme yüzeyinde oluşan açının güç ile olan ilişkisini incelemek için 1mm et kalınlığındaki parça üzerine 1m/dak hız ile 100 W ile 2000 W arasında farklı güçler uygulanmıştır. Diğer analizlerde ortaya çıkan açının iyileştirilmesi durumunu destekleyici sonuçlar elde edilmiştir. Parça kenarında oluşan açının malzeme ısı iletkenlik kat sayısı ile doğrudan ilgili olup gücün belirli bir noktadan sonra artırılması kenar açısı üzerinde etki yaratmadığı gözlemlenmiştir. Ancak analizlerde kullanılan mesh boyutu sebebi ile açının hassasiyeti daha da artırılarak analizler tekrarlanmalıdır. Ancak bu şekilde açının etkisini tam olarak anlamak mümkün olabilecektir. Analiz sonuçlarına ait grafik şekil 5.5’te verilmektedir.



Şekil 5.5 : Kesme gücünün kesme yüzeyinde oluşan açının etkisi.

Yapılan analizlerde laser kesme prosesi esnasında kullanılan gazın etkisi ve pulse sayısı incelenememiştir. Ayrıca analizlerde kullanılan bilgisayarların kapasiteleri sebebi ile mesh boyutları 0,1mm’nin altına indirilememiştir. Çalışmanın ilerletilebilmesi için mevcut yapılan analizlere macro yazılabilir ve deneysel sonuçlarla analiz sonuçları karşılaştırılarak iyileştirmeler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Acherjee, B., Kuar, A. S., Mitra, S. ve Misra, D.** (2010). Finite element simulation of laser transmission welding of dissimilar material between polyvinylidene fluoride and titanium, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, **4**, 176-186.
- [2] **Yan, Y., Li, L., Sezer, K., Whitehead, D., Ji, L., Bao, Y. ve Jiang, Y.** (2011). Experimental and theoretical investigation of fibre laser crack-free cutting of thick-section alumina, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **5**, 859-870.
- [3] **Modest, M. F.** (1997). Laser machining of ablating/decomposing materials through cutting and drilling models, *Department of Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA*.
- [4] **Rao, Z., Wu, T., Du, J. ve Lu Y.** (2010). Prediction of drilling micro-hole in CO₂ laser irradiated sticking plaster, *3rd International Photonics & Optoelectronics Meeting (POEM 2010), Journal of Physics Conference*, **276**, 1-5.
- [5] **Park, K. W. ve Na, S. J.** (2009). Theoretical investigation on multiple-reflection and Rayleigh absorption-emission-scattering effects in laser drilling, *Applied Surface Science*, **256**, 2392-2399.
- [6] **Türkoğlu, A. K., Ersoy, T., Canbaz, F. ve Aktürk, S.** (2012). Effect of waveguide behavior during femtosecond-laser drilling of metals, *Applied Physics A Material Science & Processing*, **108**, 935-941.
- [7] **Chen, X., Ji, L., Bao, Y. ve Jiang Y.** (2012). Improving cutting quality by analysis of microstructure characteristics and solidification behavior of recast lasyer formation on laser cut ceramic, *Sciverse ScienceDirect Journal of the European Ceramic Society*, **32**, 2203-2211.
- [8] **Karaaslan, A.** (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri, (1. Baskı) (Sf: 23) İstanbul, Türkiye.
- [9] **Ready, J. F.** (1997). Industrial Application of Laser, (2. Baskı) (Sf: 23) New York, USA.
- [10] **Karaaslan, A.** (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri (1. Baskı) (Sf: 36) İstanbul, Türkiye.
- [11] **Boom, L.** (1968). Gas Laser, (1. Baskı) (Bölüm:7) New York, USA.
- [12] **Born, M. ve Wolf, E.** (1980). Principles of Optics, (6. Baskı) Pergamon, Oxford.
- [13] **Karaaslan, A.** (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri, (1. Baskı) (Sf: 16) İstanbul, Türkiye.

- [14] **Kogelnik, H. ve Li, T.** (1966). *Laser Beams and Resonators*, (1. Baskı) (Sf: 1554).
- [15] **Karaaslan, A.** (2009). *Laser ile Malzeme İşlemleri*, (1. Baskı) (Sf: 47) İstanbul, Türkiye.
- [16] <http://www.sanalkaynak.org/fizik-optik-2.html> alındığı tarih 04.11.2014
- [17] <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Roof-pentaprism.svg>, alındığı tarih 04.11.2014
- [18] **Cohen, M. I.** (1967). *Journal of The Franklin Institute*, (1. Baskı) (Sf: 271) Pensilvanya, USA.
- [19] **Cohen, M. I.** (1967). *Journal of The Franklin Institute*, (1. Baskı) (Sf: 271) Pensilvanya, USA.
- [20] **Cohen, M. I.** (1967). *Journal of The Franklin Institute*, (1. Baskı) (Sf: 283) Pensilvanya, USA.
- [21] **Cohen, M. I.** (1967). *Journal of The Franklin Institute*, (1. Baskı) (Sf: 283) Pensilvanya, USA.
- [22] **Chun, M. K. ve Rose, K.** (1970). *Journal Applied Physic*, (1. Baskı) (Sf: 41).
- [23] **Ready, J. F.** (1997). *Industrial Application of Laser*, (2. Baskı) (Sf: 329) New York, USA.
- [24] **Ready, J. F.** (1997). *Industrial Application of Laser*, (2. Baskı) (Sf: 331) New York, USA.
- [25] **Clauer, A. H.** (1996). *Industrial Laser Review*, (1. Baskı) (Sf: 7).
- [26] **Belforte, D. ve Levitt, M.** (1990). *The Industrial Laser Annual Handbook*, (1990 Baskısı), Tulsa, OK.
- [27] **Belforte, D. ve Levitt, M.** (1990). *The Industrial Laser Annual Handbook*, (1990 Baskısı), Tulsa, OK.
- [28] **Belforte, D. ve Levitt, M.** (1990). *The Industrial Laser Annual Handbook*, (1990 Baskısı), Tulsa, OK.
- [29] **Belforte, D. ve Levitt, M.** (1990). *The Industrial Laser Annual Handbook*, (1990 Baskısı), Tulsa, OK.
- [30] **Wang, F. F. Y.** (1983). *Materials Processing Theory and Practices*, (Cilt:3) (sf: 137), New York, USA.
- [31] **Belforte, D. ve Levitt, M.** (1986). *The Industrial Laser Annual Handbook*, (1986 Baskısı), Tulsa, OK.
- [32] **Swift-Hook, D. T. ve Gick, A. E. F.** (1973). *Penetration Welding with Lasers*, (sf: 494), Miami, Florida, USA.
- [33] **Brick, R. M. ve Philips, A.** (1949). *Structure and Properties of Alloy*, New York, USA.
- [34] **Locke, E. V. ve Hella, R. A.** (1974). *IEEE J. Quantum Electron*, (Sf:179) New York, USA.
- [35] **Ready, J. F.** (1997). *Industrial Application of Laser*, (2. Baskı) (Sf: 377) New York, USA.

- [36] **Wang, F. F. Y.** (1983). Materials Processing Theory and Practices, (Cilt:3) (sf: 98), New York, USA.
- [37] **Ready, J. F.** (1971). Effects of High-Power Laser Radiation, (Akademik Baskı) (Sf: 391) New York, USA.
- [38] **Arthur, W. L.** (1989). Laser Marking: Rating the Player, Lasers & Optronics, (Sf: 51) New York, USA.
- [39] **Karaaslan, A.** (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri, (1. Baskı) (Sf: 174 - 175) İstanbul, Türkiye.
- [40] **Lawson, W. E.** (1992). Laser Processing of Plastic, (Sf: 92) Boston, USA.
- [41] **Locke, E. V. ve Hella, R. A.** (1974). IEEE J. Quantum Electron, (Sf:132) New York, USA.
- [42] **Engel, S. L.** (1974). Society of Manufacturing Engineers Technical Paper, (MR74-960), USA.
- [43] **Engel, S. L.** (1974). Society of Manufacturing Engineers Technical Paper, (MR74-960), USA.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Faruk SOYDAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul/13.04.1987

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
2009 mezunu.