



**Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMININ FİBER LAZER
İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

Fatih YÜCELİŞLİ

**Yüksek Lisans Tezi
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa AY**

OCAK - 2018

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMININ FİBER LAZER İLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fatih YÜCELİŞLİ

(151134109)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21/12/2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 11/01/2018

TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. Mustafa AY (F.Ü)

JÜRİ ÜYESİ: DOÇ. DR. Furkan SARSILMAZ (F.Ü)

JÜRİ ÜYESİ: YRD. DOÇ. DR. Onur ÖZSOLAK (C.Ü)

OCAK - 2018

ÖNSÖZ

Öncelikli olarak danışman hocam olan Yrd. Doç. Dr. Mustafa AY' ın çalışmamda gösterdiği ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ediyorum. Çalışma boyunca desteğini eksik etmeyen ve görüşleriyle de beni yönlendiren hocam Doç. Dr. Furkan SARSILMAZ' a teşekkür ediyorum.

Tez çalışmam süresince imalat yönünden verdiği destekten dolayı ERMAKSAN firmasına ve özellikle Ermaksan Akademi Müdürü Soykan SOKULGAN' a teşekkür ediyorum.

Aileme yüksek lisans çalışmalarım süresince gösterdikleri sabır ve destek için teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Fatih YÜCELİŞLİ

ELAZIĞ - 2018

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER.....	VIII
TABLolar.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
KISALTMALAR	XIII
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Lazerin Tarihçesi.....	2
1.2 Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi	2
1.3 Çeşitli Teknolojilerde Kullanılan Lazerler ve Karşılaştırmalı Analizleri	3
1.3.1 Optik Pompalamalı Katı Lazerler	3
1.3.2 Sıvı Lazerler	4
1.3.3 Boyar Maddeli Lazerler	4
1.3.4 Kimyasal Lazerler	5
1.3.5 Yarı İletken Lazerler	5
1.3.6 Katı Hal Lazerler	5
1.3.7 Gaz Lazerler	6
1.3.8 Serbest Elektron Lazerler	6
1.4. Titanyum GR5 (Ti-6Al-4V)	7
2. FİBER LAZERLER	8
2.1 Optik Fiberlerin Geçmişi.....	8
2.2 Optik Fiberlerin Karakteristikleri.....	10

2.3 Optik Fiber Türleri	14
2.3.1 Tek Modlu Fiberler	14
2.3.2 Çok Modlu Fiberler	14
2.3.3 İki-Kılıf Fiberler	15
2.3.4 Kutuplama Koruyan Fiberler	18
2.4 Fiber Lazer Bileşenleri	20
2.4.1 Pompa Birleştirici	21
2.4.2 Pompa ve Sinyal Birleştirici	22
2.4.3 Akusto-Optik Modülator	23
2.4.4 Çıkış Fiber Adaptörü	23
2.4.5 Optik Yalıtıcı Bileşeni	24
3. LASER IŞINI İLE KESME VE DELME	26
3.1 Lazer İle Kesme	28
3.1.1 Lazer İle Süblimleştirerek Kesme	28
3.1.2 Lazer İle Yakarak Kesme	29
3.1.3 Lazer İle Ergiterek Kesme	31
3.2 Yüksek Basıncılı Kesme	32
3.2.1 Yassı Ürünler	32
3.2.2 Asal Çelikler	33
3.2.3 Demir Dışı Metaller	33
3.2.4 Kompozit Malzemeler	33
3.3 Kesilen Yüzeyin Değerlendirilmesi	34
3.3.1 Pürüzlülüğün Değerlendirilmesi	34
3.3.2 İz Genişliği	36
3.3.3 İz Şekli	36
3.3.4 Kesilen Yüzeyin Değerlendirilmesi	37
4. LAZER IŞINI İLE KESME YÖNTEMİ	42

4.1 Lazer İle Kesme İşleminde Karakteristik Yapı	42
4.1.1. Kerf Genişliği	43
4.1.2. Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)	43
4.2. Lazer İle Kesme İşlemine Etki Eden Parametreler	44
4.2.1. Lazer Işın Parametreleri	45
4.2.1.1. Lazer Çıkış Gücü ve Yoğunluğu	45
4.2.1.2. Dalga Boyu.....	45
4.2.1.3. Kesme Hızı.....	46
4.2.1.4. İşlem Gazı ve Gaz Basıncı	47
5. MATERYAL VE METOD	48
5.1. Deney Malzemesi ve Numunelerin Hazırlanması.....	48
5.2. Lazer Işınıyla Kesme Deneyleri	49
5.3. Kerf Geometrisi Ölçümleri.....	51
5.4. Metalografik İncelemeler	52
5.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	52
6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA	54
6.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri.....	54
6.2 Lazer Işını İle Kesme Deney Sonuçları.....	57
6.2.1. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	57
6.2.2 Yeniden Katılaştıran Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları	58
6.2.2.1 YKTK' nın Güç İle Değişimi	59
6.2.2.2 YKTK' nın Kesme Hızı İle Değişimi	62
6.2.2.3 YKTK' nın Yardımcı Gaz Basıncı İle Değişimi	64
6.2.3. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları.....	66
6.2.3.1 Kerf Genişliğinin Kesme Hızına Bağlı Değişimi.....	67
6.2.3.2 Kerf Genişliğinin Güce Bağlı Değişimi	68
6.2.3.3 Kerf Genişliğinin Gaz Basıncına Bağlı Değişimi	69

6.2.4. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları	72
7. GENEL SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR.....	81



ÖZET

Titanyum ve titanyum alaşımları düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek korozyon ve ısı direnci gibi özellikleri bir arada bulundurduğu ve üstün fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı endüstride ve özellikle uzay, denizcilik ve havacılık sanayi için vazgeçilmez bir malzemedir. Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V titanyum alaşımının, ana işleme yöntemleri olarak alışılmamış imal usullerinden Lazer Işınıyla İşleme yöntemi kullanılmıştır. Lazer ile kesme işleminde mekanik kesme kuvvetleri oluşmadığından dolayı, hızlı ve titreşimsiz bir işlem yapılabilir. Lazer teknolojisi ile yapılan metal kesim işlemlerinde geleneksel yöntemlere kıyasla birçok yönden daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Geleneksel yöntemlerde olduğu gibi, lazerle kesim teknolojisinde de üretim verimliliğini arttıran ve ürün kalitesine doğrudan etki eden bir takım işlem parametreleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel malzeme kesme işlemlerinde kullanılan lazer sistemleri ve işlem parametrelerinin kesme ve ürün kalitesine etkileri incelenmektedir. Deneyler sonucunda numunelerin yüzey ve ısıdan etkilenen bölgeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, enerji dağılımı spektrometresi (EDS), X-Işını kırınım yöntemi (XRD) ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlenmiş yüzeylerin yüzey formasyonları, mikroyapı değişimleri, yeniden katılaşan tabaka kalınlığı, kerf genişlikleri, kerf eğim açıları gibi karakteristik özellikler incelenmiş ve bu karakteristiklerin işlem parametrelerine bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fiber lazer, Lazer kesme, Titanyum, Ti6Al4V

SUMMARY

Investigation of the Machinability of The Ti6Al4V Titanium Alloy's by fiber laser

Machining Processes

Titanium and titanium alloys are an indispensable material for the industry and especially for the space, marine and aerospace industries due to their high physical and chemical properties combined with features such as low density, high strength, high corrosion and heat resistance. In this thesis study, Laser Beam Machining technique has been used as an uncommon method out of the main processing methods for the Ti6Al4V titanium alloy. Since mechanical cutting forces do not occur during laser cutting, a fast and vibration-free operation can be performed. In the case of metal cutting with laser technology, many more successful results than traditional methods are obtained. Just as in traditional methods, there are also a number of process parameters in laser cutting technology that increase production efficiency and directly affect product quality. In this study, laser systems used in industrial material cutting processes and cutting parameters and their effects on product quality are examined. As a result of the experiments, surface and heat-affected regions of the samples were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction method (XRD) and microhardness measurements have been made. Characteristic features such as surface formations of processed surfaces, microstructure changes, resolidified layer thickness, kerf widths, kerf inclination angles were investigated and how these characteristics were changed according to process parameters were investigated.

Keywords: Fiber laser, Laser cutting, Ti6Al4V

ŞEKİLLER

Sayfa No

Şekil 1.1. Enerji band diyagramı[46]	3
Şekil 2.1. Işık çeşmesi olarak adlandırılan ve ışığın yönlendirilebildiğini gösteren ilk deney[46].....	8
Şekil 2.2. Basit bir optik fiber yapısı[46].	9
Şekil 2.3. Optik fiberde nüve ve kılıf yapısı[46].....	10
Şekil 2.4. Dalgaboylarına karşılık gelen fiber optik kayıplar[46].....	12
Şekil 2.5. Rayleigh saçılımı[46].	13
Şekil 2.6. İki cladli optik fiber[46].	15
Şekil 2.7. İki cladli fotonik kristal fiber[46].....	17
Şekil 2.8. İki kılıflı fiberlerin kaplama türleri [18].....	17
Şekil 2.9. Kutuplamayı koruyan fiberlerin yapısı[46].....	19
Şekil 2.10. Geçme uzunluğu ölçümünde spektrum çıkışı[46].	20
Şekil 2.11. Çentik birleştirme, açılı birleştirme, inceltirek birleştirme [19].....	21
Şekil 2.12. Pompa ve sinyal birleştirici bileşen şematiği[46].	22
Şekil 2.13. Basit bir akusto-optik modülatör şematiği [24].	23
Şekil 2.14. Fiber çıkış adaptörü şematiği[46].	24
Şekil 2.15. Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşen [46].....	25
Şekil 2.16. Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşen [30].....	25
Şekil 3.1. Laser kesme kafasının şematik şekli [32].	27
Şekil 3.2. Laser-süblimleştirme kesme sistemi; kesme gazı laser sistemi içinden (koaksiyel) malzemeye yönlendirilmektedir [25].	29
Şekil 3.3. Sistem yanından oksijen üflenerek gerçekleştirilen laser ile yakarak kesme yöntemi (şematik) [25].	30
Şekil 3.4. Alaşımsız bir çelikte c miktarına bağlı olarak kuramsal ve pratik kesme sınır değerleri [25].	31
Şekil 3.5. Laser ışını ile kesilmiş farklı malzemelerde kesilen yüzeylerde ortaya çıkan pürüzlülük değerleri R_z ; (a) alaşımsız çelik, (b) yüksek alaşımlı çelik ve (c) alüminyum alaşımı. [25].....	35
Şekil 3.6. Laser kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan iz şekilleri (şematik) [25].....	37

Şekil 3.7. Laser ile kesilen yüzeylerde oluşan curuf; (a) alt kenarda curuf oluşumu ve (b) kesilen yüzeyde curuf oluşumu (şematik) [25].	38
Şekil 3.8. Laser ile kesilen yüzeyde oluşan çatlak; (a) oluşan iz yönündeki çatlak ve (b) kesme yönünde oluşan çatlak (şematik) [25].	38
Şekil 3.9. Yapı çeliği, alüminyum ve krom-nikel çeliğinin 1500 w laser çıkış gücüne sahip laser sistemi ile yapılan laser kesmede, kalınlık - kesme hızı ilişkisi [25].....	39
Şekil 3.10. Farklı polimer malzemelerin laser ile kesilmesinde malzeme kalınlığı - laser kesme hızı arasındaki ilişki [25].....	40
Şekil 4.1. Lazer kesme işleminde karakteristik özellikler.....	42
Şekil 4.2. Kerf genişliği şematik gösterimi [56].	43
Şekil 4.3. Lazer kesim işlemi sırasında ısı tesiri altındaki bölge[56].....	44
Şekil 5.1. Lazer ile işlenen numunenin tasarım ve kesim sonrası görüntüsü.....	48
Şekil 5.2. Deneyde kullanılan fiber lazer kesim tezgahı	51
Şekil 5.3. Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi.....	51
Şekil 5.4. Tronic dhv-1000 micro vickers sertlik ölçüm cihazı	53
Şekil 6.1. Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen yüzeysel bölgeler.....	54
Şekil 6.2. Yeniden katılaştıran tabakanın üstten (kesilen yüzey), görüntüsü	55
Şekil 6.3. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi	56
Şekil 6.4. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi	56
Şekil 6.5. Sertlik ölçme deneyinin SEM görüntüsü	57
Şekil 6.6. Mikrosertlik ölçüm grafiği	58
Şekil 6.7.1. V=13600 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi.....	60
Şekil 6.7.2. V=16000 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi.....	60
Şekil 6.7.3. V=18400 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi.....	61
Şekil 6.8. Gücün YKTK' ye etkisi (A) 27 nolu numune, B) 18 nolu numune, A) 27 nolu numune).....	61
Şekil 6.9.1. P= 12 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi.....	62
Şekil 6.9.2. P= 15 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi.....	62
Şekil 6.9.3. P= 18 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi.....	63
Şekil 6.10. Kesme hızının YKTK' ye etkisi. (A) 21 nolu numune, B) 24 nolu numune, A) 27 nolu numune).....	63
Şekil 6.11.1. W=3000 watt için YKTK' nın gaz basıncına bağlı değişimi.....	64
Şekil 6.11.2. W=3500 watt için YKTK' nın gaz basıncına bağlı değişimi.....	64
Şekil 6.11.3. W=4000 watt için YKTK' nın gaz basıncına bağlı değişimi.....	65

Şekil 6.12. Yardımcı gaz basıncının YKTK' ye etkisi (A) 1 nolu numune, B) 2 nolu numune, A) 3 nolu numune)	65
Şekil 6.13.1. Güç=3000 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi.....	67
Şekil 6.13.2. Güç=3500 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi.....	67
Şekil 6.13.3. Güç=4000 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi.....	68
Şekil 6.14.1. V=13600 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi.....	68
Şekil 6.14.2 V=16000 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi.....	69
Şekil 6.14.3. V=18400 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi.....	69
Şekil 6.15.1. W=3000 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi	70
Şekil 6.15.2. W=3500 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi	70
Şekil 6.15.3. W=4000 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi	71
Şekil 6.16. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi	71
(a: 21 nolu deney w=4000 watt, v=13600 mm/dak, p=18 bar b: 7 nolu deney; w=3000 watt, v=18400 mm/dak, p=12 bar,).....	71
Şekil 6.17.1.1. W=3000 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi	74
Şekil 6.17.1.2. W=3500 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi	75
Şekil 6.17.1.3. W=4000 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi	75
Şekil 6.17.2.1. V=13600 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi	75
Şekil 6.17.2.2. V=16000 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi	76
Şekil 6.17.2.3. V=18400 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi	76
Şekil 6.17.3.1. W=3000 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi	76
Şekil 6.17.3.2. W=3500 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi	77
Şekil 6.17.3.3. W=4000 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi	77
Şekil 6.18. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi	78
(a: 7 nolu deney; v=18400 mm/dak, w=3000 watt, p=12 bar, b: 21 nolu deney v=13600 mm/dak, w=4000 watt, p=18 bar)	78

TABLÖLAR

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1: Birkaç pompa birleştirici yapısı.....	22
Tablo 4.1: Lazer kesim parametreleri [45].....	45
Tablo 5.1: Ti6Al4V titanyum alaşıımının kimyasal bileşimi (%).....	48
Tablo 5.2: Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri	49
Tablo 5.3: Lazer kesim deney sıralaması.....	50
Tablo 6.1: Mikrosertlik ölçüm sonuçları	57
Tablo 6.2: Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YKTK değerleri	59
Tablo 6.3: Lazer kesim sonrasında ölçülen ortalama kerf genişlikleri	66
Tablo 6.4: Lazer ışını ile kesim sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı değerleri.....	73

SEMBOLLER LİSTESİ

$h\nu$: Foton Enerjisi

τ : En Üst Düzey Enerji Seviyesinin Ortalama Ömrü (TO)

fs : Femtosaniye

n_1 : Nüve Kırılma İndisi

n_2 : Kılıf Kırılma İndisi

θ : Işığın Çıkış Açısı

λ : Işığın Dalga Boyu

α : Nüve Yarıçapı

I : Işığın Şiddeti

$\Delta\lambda$: Saçak Aralığı

L : Kutuplama Koruyan Optik Fiber Uzunluğu

d_b : İnceltirme İşlemi Öncesindeki Bütün Fiberlerin Toplam Çapı

d_0 : Çıkış Fiberinin Çapı

β : Kutuplanmanın Dönüş Açısı

v : Verdet Sabiti

d : Magnetik Alanın Uygulanan Uzunluğu

Z : Odak Derinliğini

df : Odak Noktası Boyutu

f : Mercek İle En Küçük Odak Noktası Arasındaki Mesafe

D : Odaklanmamış Ham Lazer Işın Çapı

KISALTMALAR

YKTK: Yeniden katılaşan tabaka kalınlığı

IEB: Isıdan etkilenen bölge

ITAB: Isı tesiri altındaki bölge

EA: Esas malzeme



1. GİRİŞ

Son yıllarda teknolojideki gelişmeler, sanayiden sağlığa, askeri savunmadan uzay endüstrisine kadar tüm alanlar, farklı birçok malzemenin kullanım gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu malzemelerin işlenmesindeki problemler lazer sistemlerinin sanayiye girmesi ile büyük oranda çözülmüş ve halen devam eden çalışmalar ile işlem kalitesi günden güne artmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında sağlık sektöründen uzay endüstrisine kadar birçok alanda kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımı fiber lazer tezgahında işlenerek incelenmiştir.

Günümüzde metal malzeme endüstrisinde Titanyumun kullanım alanları da artmaktadır. Titanyum yüksek derecede şekillendirilebilirlik özelliğine sahip, düşük yoğunluklu (4.54 gr/cm^3) bir elementtir. Titanyum ve alaşımlarının sahip olduğu yüksek dayanım, iyi tokluk, düşük yoğunluk, biyouyum ve iyi korozyon dayanımı gibi özelliklerinden dolayı uzay endüstrisi ve yüksek performansın gerekli olduğu uygulamalarda oldukça fazla kullanım alanına sahiptir. Titanyum pazarının yaklaşık % 60'ı büyük öneme sahip ve geniş kullanım alanına sahip Ti6Al4V'dir. Bu titanyum alaşımı yukarıda da bahsedildiği gibi, yüksek yorulma direnci, korozyon direnci, yüksek biyouyumluluk ve yüksek dayanıma sahiptir.

Titanyum, işletmelerin maliyetlerini azaltan birçok etkiye de sahiptir. Örneğin, titanyum ilavesi ile makine ağırlıkları azalmakta, uçaklar daha az yakıt harcamaktadır. Bununla birlikte titanyum yüzeyinde oluşan ince oksit tabakasının kimyasallara karşı korozyon direncine sahip olması petro-kimya tesislerindeki bakım maliyetlerini düşürmektedir. Titanyum esaslı sistemlerdeki güvenilirliğin yanı sıra malzeme açısından da yüksek performans ve uzun ömürlülük bu metalin tercihiinde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının endüstriyel malzeme kesme işlemlerinde kullanılan lazer sistemleri ve işlem parametrelerinin kesme ve ürün kalitesine etkileri incelenmektedir. Deneyler sonucunda numunelerin yüzey ve ısıdan etkilenen bölgeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, enerji dağılımı spektrometresi (EDS), X-Işını kırınım yöntemi (XRD) ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. İşlenmiş olan yüzeylerin yüzey formasyonları, mikroyapı değişimleri, yeniden katılaştıran tabaka kalınlığı, kerf genişlikleri, kerf eğim açıları gibi karakteristik özellikler incelenmiştir.

1.1 Lazerin Tarihçesi

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimesi ”uyarılmış ışınım yayılımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi” şeklinde ifade edilmektedir. Lazer atomik enerjiyi elektro manyetik enerjiye dönüştürür. Lazerin icadı; ilk kez 1958 yılında C.H. Townes ve A.L. Schawlow tarafından “Infrared and Optical Masers” adlı yayınla maser kelimesi ile tarif edilmiştir. Maser, atomların, dışarıdan uyarılması sonucunda dışarıya salınan radyasyon mikrodalga frekansında optik yardımıyla elde edilen, genliği yükseltilmiş elektromanyetik dalgadır. Maser kelimesi, İngilizce (Microvawe Amplification by Stimulated Emission of Radiation) cümlesindeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiştir. Maserler, çok çeşitli, koherent ve tek renk ışık elde etmek amacıyla oluşturulan optik düzeneklerdir. Optik frekanslarda çalışan bu sistemler ise optik maser veya lazer olarak isimlendirilir. 1961 yılında Sorokin ve Stevenson U:CaF₂ lazeri ile ilgili çalışmalarını yayınlamıştır[1]. Mathias 1963’te N₂ lazerini, 1964’te Geusic YAG(ıterbiyum alüminyum garnet) lazerini bulmuştur. Bridges ise Ar-Ion lazerini bulmuştur [2]. 1970 yılında CO ve H₂’nin O₂ ile yanarak CO₂ ve H₂O açığa çıkarmasıyla ışığa yapan ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından bulunmuştur[2]. Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, diyot lazerleri bulunarak ve geliştirilerek lazer teknolojisi bugün ki savunma sanayinden endüstriye, tıp alanından; haberleşme, bilgisayar ve eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır[2,3].

1.2 Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları birçok enerji düzeyinde bulunabilir. Bu enerji düzeyleri arasında elektronlar hareket ederken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye “teşvik edilebilir” ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur[4].

Lazer ışınının oluşumu için enerji düzeyleri arasında 3 temel şartın gerçekleşmesi gerekmektedir.

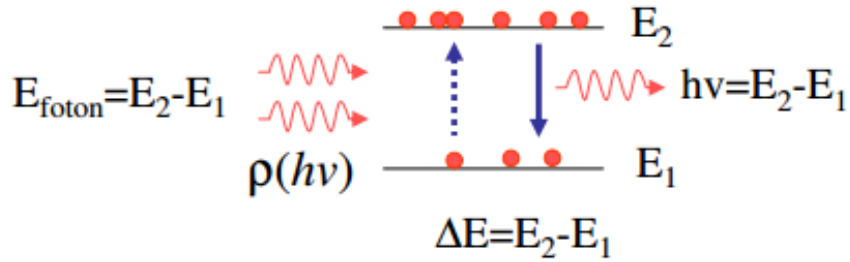
Bu şartlar:

1. Pompalama sistemi
2. Enerji düzeyleri arasındaki fark (invers durum)

3. Optik rezonans

Bu şartlar sağlandığında lazer ışını elde edilebilir.

Lazerlerin çalışma prensibini anlayabilmek için Şekil 1.1’ de gösterilen, enerjileri E_1 ve E_2 olan iki enerji seviyesini göz önüne alalım. Enerji seviyelerindeki elektron yoğunluklarının sırası ile N_1 ve N_2 olduğunu ve bu sistemin aynı zamanda $\rho(h\nu)$ foton alanı içinde olduğunu düşünelim [39].



Şekil 1.1. Enerji band diyagramı[46]

Band diyagramına dışarıdan gönderilen $h\nu$ enerjili fotonlar birinci pompalama şartını sağlamaktadır. Atomdaki bir elektron iki enerji seviyesi arasında geçiş yaparsa bir foton salar veya soğurur. Lazer ışınının oluşması için gerekli olan ikinci şart $N_2 > N_1$ olması ve alt seviyedeki elektronların üst seviyeye uyarılarak geçiş yapmasıdır. Bu işleme nüfus terslemesi denir. Eklemin ilk ve son noktalarına ayna görüntüsü oluşturacak şekilde optik parçalar yerleştirildiğinde ise salınan fotonların bir kısmı eklemden dışarı çıkabileceği gibi bir kısmı da aynadan geri yansiyarak eklem içerisine dönecektir. Bu sayede üçüncü şart da sağlanmış olacaktır.

1.3 Çeşitli Teknolojilerde Kullanılan Lazerler ve Karşılaştırmalı Analizleri

1.3.1 Optik Pompalamalı Katı Lazerler

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyararak yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından biri de lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olması sebebiyle güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi gerekir[4].

Optik pompalamalı lazerde uygun malzemeden yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve lazer ışığının yansıtılması için ayna ile kaplanmıştır.

Çubuğun yan çeperi saydamdır. Böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli modda çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasına benzer) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmesiyle ya da ışığının bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmasıyla olabilir. Yapılan ilk lazerde yapay bir gök yakut kristali (safir, alüminyum oksit) olan pembe yakut kullanılmıştır. İlerleyen süreçte birçok farklı elementler kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimyumdur. Bu tür lazerden, binlerce wattlık güçler elde edilebilir[46].

1.3.2 Sıvı Lazerler

Katı lazerlerin bir dezavantajı, yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılmanın ve hasarın ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camlı çubuk yerine saydam bir bölme içine konulmuş uygun bir sıvı (örneğin; neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçler elde edilebilir[4] .

1.3.3 Boyar Maddeli Lazerler

Bazı organik boyarmaddeler flüor ışıma özelliği gösterir. Bu maddeler üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlarlar. Atomların uyarılmış durumda bulunma süresinin çok kısa ($\tau \sim 0.25 \text{sn}$) olmasına ve yayımlanan ışığın dar bir bantta toplanamamasına karşılık, boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının nedeni geniş bir frekans bölmesi içinde ayarlanabilme özelliğinin olmasıdır[4]. Rodamin 6G gibi boyarmaddeler başka bir lazerle uyarıldığında lazer etkisi gösterir. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G, sürekli zaman modunda çalışan ilk lazerin gerçekleştirilmesinde faydalanan boyarmaddedir. Böylece frekansı ayarlanabilen sürekli bir lazer demetinin elde edilmesine olanak sağlanmıştır. Bir başka boyar madde olan metilumbelliferon, hidroklorik asitle karıştırıldığında ışık tayfının morötesinden sarıya kadar uzanan bölgesinde lazer etkisi gösterir. Tayfın bu bölgesinde istenilen dalga boyunda lazer ışığı elde edilebilir[4].

1.3.4 Kimyasal Lazerler

Kimyasal tepkimelerde lazer etkisinin oluşmasına yetecek sayıda yüksek enerjili atomlar ortaya çıkar. Örneğin, hidrojen ve flor elementleri hidrojen florür oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde ortamda bulunan CO_2 gazında lazer etkisi oluşur. Bu tür lazerlerde az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek mümkündür[4].

1.3.5 Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerlerde farklı türden katkılanmış iki yarı iletken madde düz bir eklem oluşturacak şekilde yan yana getirilmiştir. Böyle bir komponentten şiddeti yüksek bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde lazer ışığı ortaya çıkar. Çıkış güçleri sınırlı olan yarı iletken lazerler, maliyetlerinin düşüklüğü, boyutlarının küçük olması ve verimliliklerinin yüksekliği nedeniyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık ölçme cihazlarında kullanılır[4].

1.3.6 Katı Hal Lazerler

Katı hal lazerlerde kullanılan ilk gereç yakuttur (1960). Yakut, % 0.05 oranında üç değerli krom iyonlarını (Cr^{+++}) içeren, saydam bir Al_2O_3 alümina kristalidir. Krom iyonlarının enerji düzeylerinin konumu nedeniyle nüfus evirtimine olanak sağlar. Uygulamada, yapay yakutlardan yontulmuş çubuklar kullanılır. Yayılım dalga boyu, kızıl bölgede 694.3 nm'dir. Serbest çalışmada bir yakut lazeri 30-40 Kw güç sağlar. Darbeli modda ise 30 ile 100 MW arası güç sağlar[4].

Neodimli cam, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra ortaya çıkmıştır. Neodim iyonlarıyla (Nd^{+++}) katkılanmış biçimsiz bir malzeme (cam) söz konusudur. 1060 nm de (yakın kızılötesi) yayılım yapan, 4 düzeyli bir malzeme olan neodimli cam lazerleri yalnızca darbeli modda kullanılır. Birbirinden oldukça farklı iki türü vardır. Birincisi askeri uzaklık ölçümünde kullanılan küçük lazerler, ikincisi ise plazmaları çekirdek kaynaşmalarını incelemeye kullanılan yüksek güçlü lazerlerdir. İkinci tür lazerler ise bir lazer yükselteci bataryası şeklindedir[4].

YAG, neodimyum katkılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Sürekli modda ya da darbeli modda çalışmaya olanak sağlayan Er(erbiyum) ya da holmiyum iyonları gibi başka malzemeler üzerinde de incelemeler yapılmaktadır[4].

1.3.7 Gaz Lazerler

Lazer ortamı çoğunlukla bir gaz karışımından oluşur. Karışımındaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla diğer bileşene aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olan, helyum-neon lazerleridir. Bu lazerlerde yayılım çizgilerini veren gaz neon gazıdır. En çok kullanılan dalga boyu, kızıl bölgede 632.8 nm'dir. 1150 ve 3390 nm'lik tayf çizgileri de kullanılabilir[4].

İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan lazerlerdir. En yaygın olan argon lazerinde argon atomları, elektrik boşalmasının elektronlarıyla çarpışarak iyonlaşır. Bu lazerlerle çok sayıda tayf sayısı elde edilebilir (Mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496.5 nm ve 514.5 nm) [4].

Karbondioksit lazerlerde, lazer oluşumu için karbondioksit moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışımı karbondioksit, helyum ve azottan oluşur. Uyarım azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli ya da darbeleri modda kullanılabilen yayılım kızılaltı bölgede (10.6 μm ya da 9.6 μm) yapılır. CO_2 lazerleri %10 - %15 arasında değişen yüksek bir verime sahiptir. Kısa darbeleri çalışmada 10 TW, maksimum güç, sürekli çalışmada ise 400 kW'tır[4].

Metal buharlı lazerlerde (en yaygın olanı helyum-kadmiyum) etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdan oluşur. 100 mW'a kadar olan güçlerde, 441.6 nm ve 325 nm'lik dalga boylarıyla sürekli çalışma sağlanabilir[4].

En son gerçekleştirilmiş lazer tipi olan diyot lazerlerinde etkin ortam olarak atom halinde diyot kullanılır ve cam lazerinin dalga boyuna yakın, 1315 nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayılım gerçekleştirilir. Bu tip bir lazer ile 1 TW'lık güç sağlanabilir[4].

1.3.8 Serbest Elektron Lazerler

Serbest elektron lazerleri, bir hızlandırıcıdan çıkan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit bir magnetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli bir ışın kaynağı elde etmeye olanak sağlar. Elektronların enerjileri veya magnetik alanın dönemi değiştirilerek, X ışınlarından uzak kızılötesine kadar değişen farklı dalga boyları elde edilebilir[4].

1.4. Titanyum GR5 (Ti-6Al-4V)

GR 5, Titanyum alaşımları içerisinde en çok kullanılanıdır. Dünya genelindeki titanyum tüketiminin %50 sini Gr5 oluşturur. Bu kadar çok kullanılmasını sağlayan birçok faydalı yönü vardır. Gr5 mekanik özellikleri artırılmak için ısıtılabilir, diğer alaşımlar ısıtılabilir işlem görmediği için bu çok önemli bir özelliktir. GR5, 320°C sıcaklığa kadar kaynaklı birleştirilmiş şekilde kullanılabilir. Hafif bir metal olarak, yüksek bir sağlamlık sunar ve aynı zamanda kolay şekillendirilebilen ve korozyon direnci yüksek olan bir alaşımdır. GR5, çok yönlü kullanım avantajlarından dolayı başta havacılık, denizcilik, kimya ve medikal sanayi olmak üzere birçok sektörde kullanılır.

- **Üstün Özellikleri**
 - Yüksek korozyon direnci
 - Yüksek mukavemet
 - Isıl işleme tabi tutulabilme
- **Kullanım Alanı**
 - Havacılık sanayi
 - Denizcilik sanayi
 - Medikal sanayi
 - Kimya sanayi
- **Fiziksel Özellikler**
 - Özkütle: 4,43 g/cm³
 - Erime noktası: 1650 °C
 - Isıl iletkenlik: 6,6 W/m•°C
 - Özgül ısı: 565 J/Kg•°C
 - Kaynak kabiliyeti: Çok iyi
- **Mekanik Özellikler**
 - Çekme direnci: 130 ksi
 - Akma direnci: 120 ksi
 - Uzama: %10
 - Sertlik: 33 HRC

2. FİBER LAZERLER

2.1 Optik Fiberlerin Geçmişi

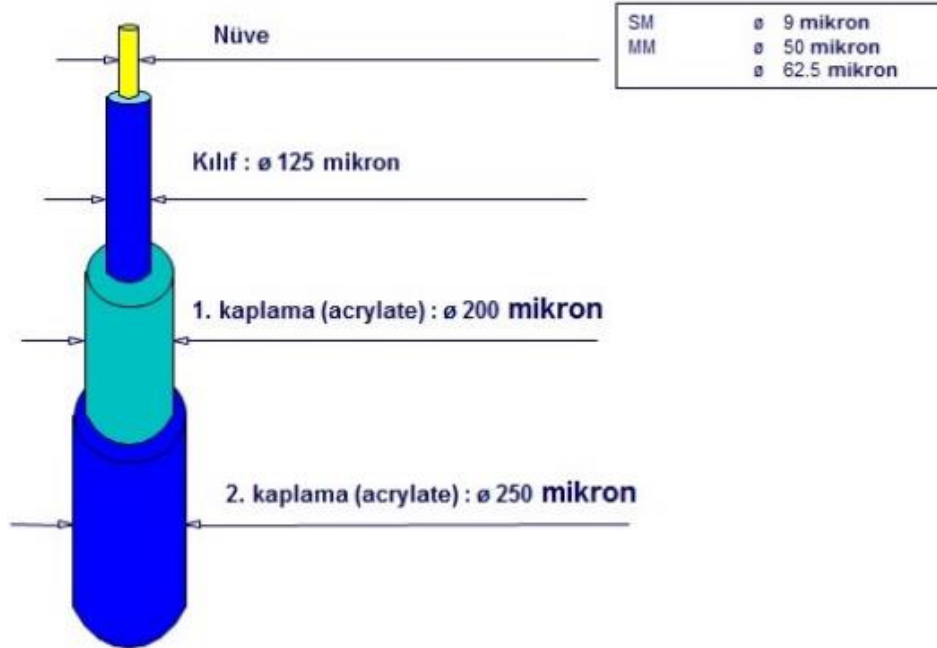
Optik fiberler, ışık iletimi için cam veya plastik yapıda olup ve toplam iç yansıma (total internal refraction) prensibine dayalı bir çalışma prensibine sahiptir. Toplam iç yansıma yoluyla, ışık yönlendirme fikri ilk olarak 1854 senesinde John Tyndall tarafından gösterilmiştir. Tyndall akan bir suyu kullanarak ışığa yön verilebildiğini göstermiş ve bunu “light fountain” (ışık çeşmesi) olarak adlandırmıştır[5].

1920'li yıllarda, cam materyali dalga kılavuzu seçilerek yapılan ilk optik fiber üretilmiştir. Ancak bu ilk üretilen optik fiberler ışığı daha iyi yönlendirmeyi sağlayan kılıf (cladding) yapısına sahip değildiler. Işığı yönlendirme adına daha iyi performans gösteren, kılıfa sahip optik fiberler için 1950'li yıllara kadar beklemek gerekti. 1950'lerde silika yapısına sahip ilk optik fiberler Hirschowitz tarafından üretildi. Fakat ışık bu üretilen optik fiberlerde, günümüzde kullanılan optik fiberlere göre oldukça fazla kayıplı bir şekilde yol almaktaydı. Bu kayıpların başlıca nedenleri kızılötesi Emilimi ve Rayleigh saçılımıdır. 1970'li yıllarda optik fiberlerde yeni bir teknoloji geliştirilmiş ve Rayleigh saçılımını ve kızılötesi Emilimini, 1.55 μm dalgaboyuna sahip ışıklar için en düşük seviyeye indirecek optik fiberler elde edilmiştir. 1.55 μm dalgaboylu ışığı, çok az kayba uğraması sebebiyle modern telekomünikasyon teknolojisi için temel taşı olmuştur.



Şekil 2.1. Işık çeşmesi olarak adlandırılan ve ışığın yönlendirilebildiğini gösteren ilk deney[46].

Bu yenilik, doğrusal olmayan fiber optik adında yeni bir alan oluşmasına neden olmuştur. 1972'li yıllarda, uyarılmış Raman ve Brillouin saçılması keşfedilmiştir[6,7] . Bu çalışmalar birçok yeni alana örnek olmuştur. Bunlardan en önemlileri, optik olarak uyarılmış çiftkırınım (optically induced birefringence) , parametrik dördümlü dalga karıştırma (parametric four-wave mixing) ve kendiliğinden faz modülasyonudur (self-phase modulation) [8-10]. [1973 yılında ilk kez soliton-benzeri atom oluşumları teorik olarak gösterilmiştir. 1980 yılında optik fiberlerin, dağılım (dispersion) ve doğrusal olmayan etki (nonlinearity effect) özellikleri deneysel olarak da gösterilmiştir. Bu gelişmeleri, atımların sıkıştırılması çalışmaları izlemiş ve 1987 yılında 6 femtosaniye (fs) genişliğinde atımlar elde edilmiştir[11] . 1990'lı yıllardan sonra fiber optik yükselticiler adında yeni bir alan oluşmuştur. Bu alanın oluşmasındaki en önemli etken, nadir toprak (rare earth) materyal katkılı optik fiberlerin üretilmesidir. Bu nadir toprak elementlerinden biri olan Erbium (Er) ile katılanmış optik fiberlerin çıkış dalgaboyu 1.55 μm olduğu için telekomünikasyon sistemleri için erbium katkılı optik fiberler çok cazip olmuştur. Fiber optik yükselticiler mod-kilitli rejimler açısından önemlidir. Mesela dağılım kontrollü soliton (dispersion-managed soliton) [12], similariton[13] , dağıtıcı soliton (dissipative soliton) [14], ve daha çok yeni bir yöntem olan soliton-similariton [15] bunlara örnek gösterilebilir.



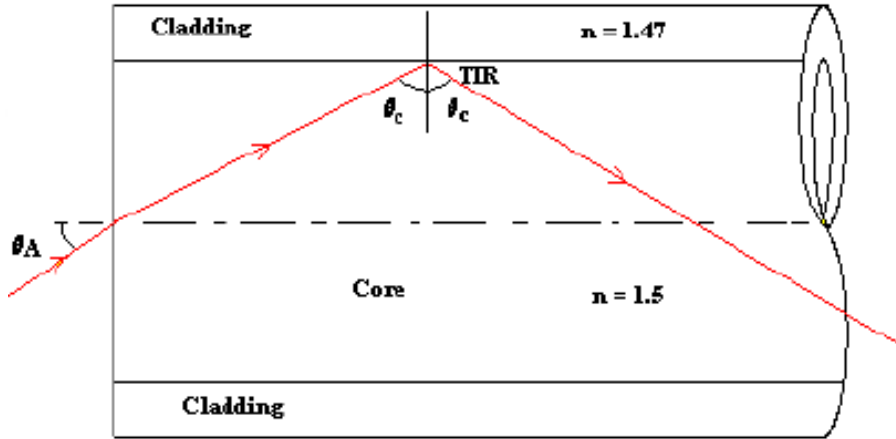
Şekil 2.2. Basit bir optik fiber yapısı[46].

2.2 Optik Fiberlerin Karakteristikleri

Optik fiberler genelde bir tane, ışığın yol aldığı kısım olan nüve (core), bir tane, ışığı nüve içerisinde tutmaya yarayan kılıf ve bir adet fiberleri çevresel etkilerden koruyan kısım olan koruyucu (coating) bölümlerinden oluşmaktadır. Kılıf kısmının kırılma indisi nüve kısmın kırılma indisinden çok az daha düşüktü. Ve böylelikle ışık toplam iç yansıma sayesinde nüve içerisinde çıkmadan ilerleyebilmektedir. Figur step indisli optik fiber türünü göstermektedir. Kılıf ve nüve kırılma indisleri, numerical aperture (NA) diye adlandırılan çıkış veya giriş açısını (Şekil 2.3) belirler ve

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = n \sin(\theta) \quad (2.1)$$

şeklinde hesaplanır. n_1 nüve kırılma indisi, n_2 kılıf kırılma indisini ifade eder.



Şekil 2.3. Optik fiberde nüve ve kılıf yapısı[46].

θ da ışığın çıkış açısını, n kırılma indisini göstermektedir. Step-index, graded index gibi birçok fiber türü bulunmaktadır. Bunlardan en geneli step-index fiberlerdir. Bu tür fiberler sahip oldukları V -parametresi diye isimlendirilen bir değişken sayesinde hem tek-modlu ışık hem de çok modlu ışıkların yönlendirilmesinde kullanılabilir ve,

$$V = \frac{2\pi a(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}{\lambda} \quad (2.2)$$

şeklinde bulunur. λ ışığın dalga boyu, n_1 nüve kırılma indisi, α nüve yarıçapı, n_2 kılıf kırılma indisidir. V -parametresi fiber içerisinde, ışığın hangi modları desteklediğini gösteren bir parametredir. Eğer bir optik fiberde $V < 2,405$ ise bu fiber sadece tek bir modu destekler. Örneğin $1\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip ışık için, genel tek-mod fiberlerin NA sı 0.16 , nüve yarıçapı $2\mu\text{m}$ ise, sonuç olarak V -parametresi 2 çıkar. $1 - 1.5\mu\text{m}$ dalgaboyundaki ışıklar için, çok-modlu fiberlerin ise nüve çapı $25 - 30\mu\text{m}$ 'den daha büyüktür[46] .

Optik fiberlerdeki bir diğer parametre ise dağılımdır ve ışığın sahip olduğu birbirinden farklı frekansların optik fiberde farklı hızlarda yol almasına sebep olan bir parametredir. Üç adet dağılım çeşidi vardır; materyal, dalgakılavuzu ve kipsel (modal) dağılımdır. Bu türler arasındaki en etkili olanı ise materyal dağılımdır. Materyal dağılım ortamın emilim frekansı ile ışığın frekansının rezonansa girmesiyle oluşur. Silikanın rezonans dalga boyları, $0.0684\mu\text{m}$, $0.116\mu\text{m}$, $9.896\mu\text{m}$, $0.696\mu\text{m}$, $0.408\mu\text{m}$, $0.897\mu\text{m}$ 'lerdir. Ancak $1\mu\text{m}$ ve $1.5\mu\text{m}$ dalga boyları için bu etki görülmez. Dalgakılavuzu dağılımı, optik fiber içerisinde farklı frekansa sahip ışığın, farklı yol alma hızına sahip olmasıdır. Kipsel dağılım ise dalgakılavuzu dağılımına benzer biçimde, farklı modların farklı yol alma hızlarına sahip olmasıdır. Dağılım optik fiberlerde çok önemli bir parametredir. Çünkü kısa atımların genişlemesine olanak sağlar. Optik fiberlerde bir diğer önemli parametre ise doğrusal olmayan etkilerdir. Bunlar ikincil etki olan ikinci harmonik üretimi (second-harmonic generation), toplam-frekans üretimi (sum-frequency generation) ve üçüncül etki olan üçüncü- harmonik üretimi (third-harmonic generation) ve son olarak Kerr doğrusal olmayan etkisidir. ikincil etkiler ortamın yapısal simetrisinden dolayı değeri sıfırdır. Bu etkiler arasında optik fiberlerde oluşan (özellikle yüksek güçlü lazer sistemlerde) en önemli etki Kerr doğrusal olmayan etkisidir. Yoğun ışık cam gibi yapılarda ilerlerken Kerr doğrusal olmayan etki oluşur. Kerr doğrusal olmayan etki, kırılma indisini değiştiren bir etkidir ve ışığın şiddeti ile doğru orantılıdır[46].

$$\Delta n = n_2 I \quad (2.3)$$

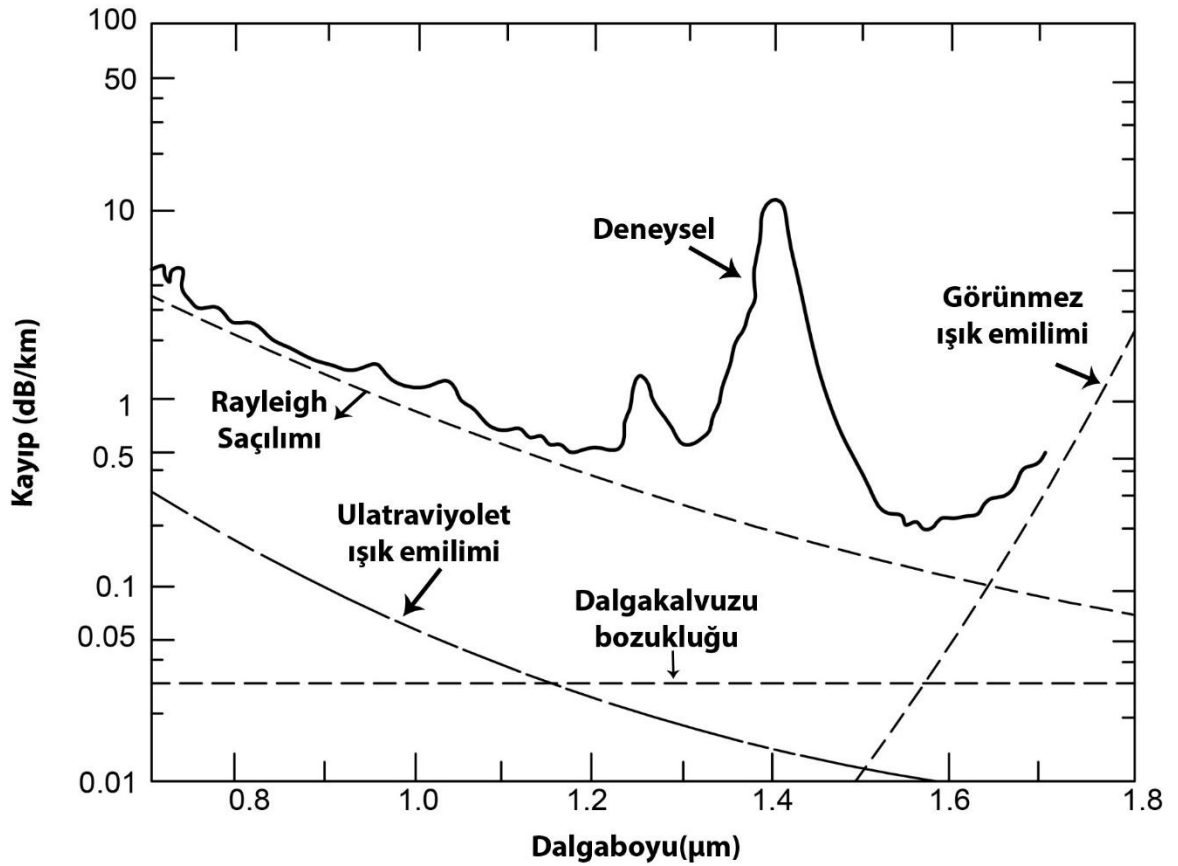
n_2 kırılma indisi, I ışığın şiddetini ifade etmektedir.

Şiddeti yüksek, kısa atımlarda (geniş spektrum) bu etki oldukça açık bir biçimde gözlemlenebilir. Atılımın en güçlü noktasındaki frekansların hızları yavaşken, diğer frekanslar relatif olarak daha hızlıdır. Böylece ışığın sahip olduğu spektrum genişlemeye başlar.

Bir başka önemli parametre ise optik fiberin içsel kaybıdır. içsel kayıp ne kadar optik gücün fiberin diğer ucuna iletildiğini ifade eder. içsel kayıp,

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (2.4)$$

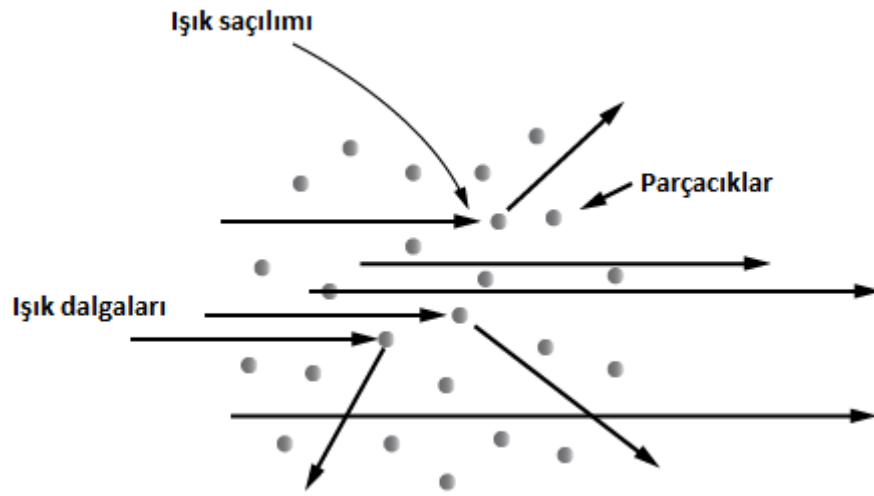
Şeklinde hesaplanır. Optik fiberdeki kayıplar sırasıyla materyal Emilimi, Rayleigh saçılımı, dalga kılavuzu düzgünlüğü, fiber birleştirmeden ve bükülmeden kaynaklanan kayıplardır[16].



Şekil 2.4. Dalgaboylarına karşılık gelen fiber optik kayıplar[46].

Materyal Emilimi iki kategoride düşünülebilir. Birisi içsel Emilim diğeri ise dışsal Emilim. içsel Emilim, bazı özel moleküllerle ışığın rezonansa girmesinden kaynaklanır. Mesela genel fiberlerde kullanılan silika molekülleri, ultraviyole dalgaboyları $< 0.4\mu\text{m}$ ile elektronik bir rezonansa oluştururken, kızılötesi dalgaboyları ile de titreşimsel rezonans oluşturuşlar. Silika moleküllerinin oluşturduğu rezonans $1.3\mu\text{m}$ ile $1.6\mu\text{m}$ arasındaki dalgaboyları için oldukça azdır (Şekil 2.4). Fakat dışsal Emilim, fiber içerisindeki saf olmayan kısımlardan

dolayı oluşur. Geçiş metallereinden olan Fe, Cu, Co, Ni, Mn, Cr 0.6 ile 1.6µm dalgaboyu aralığında oldukça yüksek bir emilime sahiptir. Bu yüzden bu dışsal emilimin az olması için saf olmayan metallerin milyonda bir oranına indirmek gerekmektedir. Dışsal emilimin diğer nedeni ise fiberde OH⁻ iyonunun bulunmasıdır. OH⁻ iyonunun titreşimsel rezonansı yaklaşık 2.73µm'dir. Bu dalgaboyu kadar da 1-2µm dalgaboyu olan genel fiberlerin desteklediği aralıkta olmasa da 2.73µm 'nin rezonansları da 1.39, 1.24 ve 0.95µm optik güç kaybına yol açmaktadır. Günümüzdeki modern teknoloji, OH⁻ iyon konsantrasyonunu oldukça az seviyeye indirmiş hatta bu değer neredeyse yok denecek kadar azdır. [16]



Şekil 2.5. Rayleigh saçılımı[46].

Bir diğer optik güç kaybına neden olan etki Rayleigh saçılımıdır. Bu etki, fiberi oluşturan moleküllerle ilgilidir. Fiberin yapımı sırasında, silika molekülleri rastgele bir şekilde erir ve o şekilde donarlar. Bu rastgelelik bazı kırılma indisinde mikron seviyesinde farklılıklara yol açar. Bu rastgele oluşan silika moleküllerinin büyüklüğüne ve ışığın dalgaboyuna bağlı olarak, saçılım fazla veya az olabilir. Şekil 2.5' te de görüldüğü gibi ışığın dalgaboyu arttıkça saçılım azalmaktadır[11].

Dalga kılavuzu mükemmeliyeti de optik güç kaybı bakımından önemlidir. Mükemmeliyet nüve çapının ve kırılma indisinin değişkenliğini ifade eder. Bu değişkenlikler ışığı yanlış yöne yönlendirerek optik güç kaybına neden olur.

Fiber birleştirme ve bükülme yarıçapından kaynaklanan optik güç kayıpları genellikle mekanik problemlerdir. Yani fiber üretimi esnasında değil fiberi kullanırken ortaya çıkarlar. Fiber birleştirme, iki veya daha fazla fiberi, bir başka bir veya daha fazla fiber ile elektriksel

ark aracılığıyla birleştirme işlemidir. Eğer birleştirme yapılan fiberlerin NA, kip alanı (Mode Field Area) veya fiber yapısı gibi parametreler arasında farklılıkların varsa, optik güç iletiminde oldukça fazla kayba sebep olabilir. Bunun yanı sıra bükülmeden kaynaklanan optik güç kayıpları da özellikle endüstriyel alanlarda oldukça önem kazanmaktadır. Endüstri için yapılan fiber optik sistemlerde bir yere sığabilmek için fiberler bükülme durumunda kalabilir. Aşırı optik güç kaybı istenmiyorsa bu bükülme yarıçaplarının çok iyi bilinmesi gerekir. Bu yarıçapı NA belirler; NA ne kadar büyükse bükülme yarıçapı da o kadar azaltılabilir[46].

2.3 Optik Fiber Türleri

Fiber lazer sistemlerinde farklı amaçlara yönelik birçok optik fiber türü geliştirilmiştir. Genel yapıları benzer olmasına karşın kullanım alanına göre bazı farklı özelliklere sahiptirler. Bu kısımda tek ve çok modlu fiberler, iki-kııflı fiberler, kutuplama koruyan fiberler anlatılacaktır.

2.3.1 Tek Modlu Fiberler

Tek-mod fiberler optik fiber türleri içerisinde en yaygın olarak kullanılan basit bir optik fiber türüdür. 1 μm ve 1.5 μm dalga boyları için nüve çapları 3 ile 20 μm arasında değişiklik gösterebilir. 15 μm ve üzeri çapa sahip olan optik fiberler geniş kip alanlı (Large Mode Area) olarak isimlendirilmektedir. Geniş kip alanlı türündeki optik fiberler genellikle yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde sinyali iletme işleminde kullanılırken pompa ışığını elimine etmek için de kullanılabilir. Tek modlu fiberlerde nüve çapı arttıkça Kerr-doğrusal olmayan etkisi azalmaktadır. Bunun nedeni birim alana düşen ışığın gücünün geniş çaplı nüvelerde daha az olmasıdır. Tek-modlu fiberler *Yb*, *Er* gibi nadir toprak materyaller kullanılarak takviye edilebilir. Yani tek-modlu fiberler kazanç fiberi olarak da kullanılabilir. Bu tür kazanç fiberleri nüve-pompa güçlendirici sistemleri olarak da isimlendirilirler. Işın demeti, tek-modlu fiberlerde ışığın odaklanabilirliğini belirleyen ışığın kalitesi bozulmadan ilerleyebilmektedir. Bu yüzden fiber lazer sistemlerinde tercih edilir.

2.3.2 Çok Modlu Fiberler

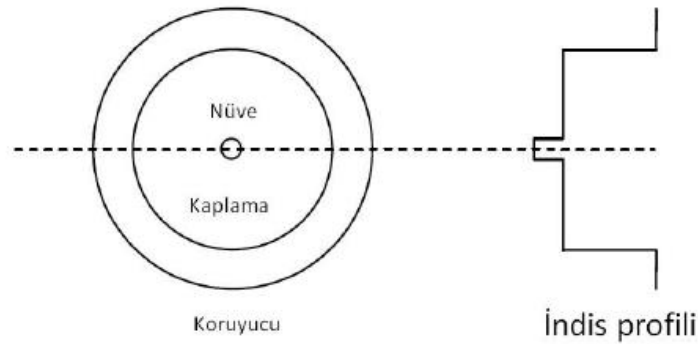
Çok modlu fiberler genellikle yüksek güçlü pompa diyotlarında kullanılırlar. Yüksek güçlü pompa diyotlarının sahip olduğu modların bir önemi yoktur. Tek-modun önemli

olmadığı yerlerde kullanılabilirler. Bu tür fiberlerin nüve çapları büyük olduğu için yüksek güçlü sinyallerin iletiminde oldukça yararlıdır.

2.3.3 İki-Kılıf Fiberler

Fiber lazerlerde daha güçlü ışık elde edebilmek için katı hal pompa diyotları gerekmektedir. Günümüzde, 500W'a kadar güç sağlayan pompa diyotlar olmasına rağmen tek-modlu fiberlerin nüve kısmına bu gücü aktarmak mümkün olmadığı için fiber lazer güçlendiricilerde yaklaşık 50W'lık pompa diyotlar kullanılmaktadır. Bu seviyedeki güçler genellikle nüve çapı 105 μm olan fiberlerle aktarılmaktadır. 500W'lara doğru gidildikçe nüve çapı 600 μm 'lere kadar çıkabilmektedir. Ancak sinyalinizi güçlendirmek için kullanılan tek-modlu fiberler V-parametresine göre en fazla 15 μm olabilmektedir. Sinyal tek-modda kalacak şekilde 15 μm olan nüve çapı artırılabilir. Bunu NA parametresi belirler. Fiberlerin NA'sını düşürmek için nüve çaplarının artması zorunludur. Fakat bu da tek modda kullanımı zorlaştırmaktadır. 15 μm nüve çapına sahip bir fiberin NA'sı yaklaşık olarak 0.05'lerde olur. Bu değer altında fiberler bükülme, birleştirme gibi kayıplarda çok hassas bir hale gelmektedir.

Bu problemin kalkması için iki-kılıf fiberler geliştirilmiştir.[17] Geliştirilen bu fiberde pompa birinci kılıfta ilerlerken sinyal nüve kısmında çoklu moda girmeden ilerleyebilmektedir. Genelde birinci kılıfın NA'sı 0.46 iken nüve NA'sı 0.07'lere (nüve çapı 20 μm) kadar inebilmektedir. Çünkü pompanın çok-modlu ilerlemesinde hiçbir problem yoktur.



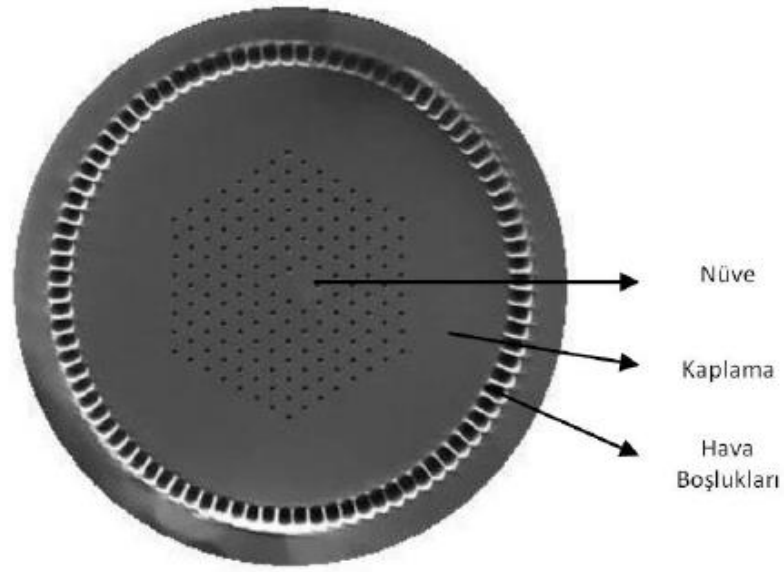
Şekil 2.6. İki cladli optik fiber[46].

Bir başka fiber türü ise fotonik kristal fiber olarak isimlendirilen ve nüve ile birinci kılıf çevresinde hava boşluklu bir yapıya sahip fiberlerdir. Bu tür fiberler bükülme hassasiyeti bakımından oldukça iyi olmasına karşın hava boşlukları aşırı derecede yalıtkan olduğundan dolayı ısısal problemler meydana gelmektedir. Bir diğer problem ise fiberleri birleştirirken ortaya çıkmaktadır. Hava boşlukları ışığın yol almasını sağladığı için herhangi bir noktada hava boşluğuna zarar gelmesi çok yüksek kayıplara sebep olmaktadır. Bunun için bu tür fiberlerin birleştirilmesi oldukça zahmetlidir.

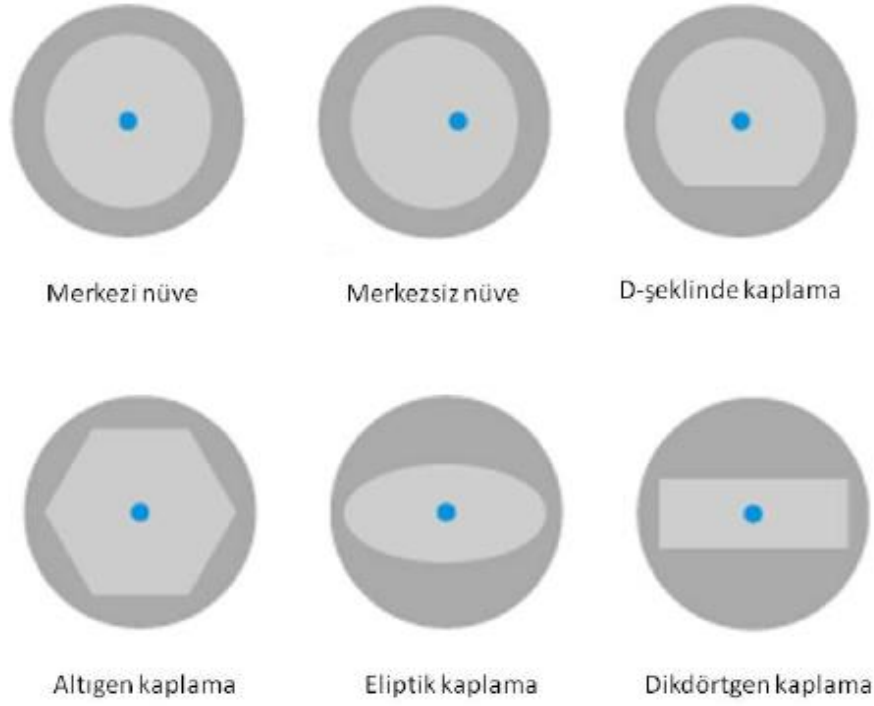
Fiberlerin birinci kılıf yapısına dikkat edilirse yuvarlak olmayan bir yapıya sahip olduğu gözlemlenir. Bunun sebebi pompa ışığının nadir-toprak iyonları tarafından daha iyi soğurulmasına yardımcı olmaktır. Eğer pompanın ilerlediği clad yapısı tam yuvarlak bir şekilde olsaydı pompa ışığında desteklenen bazı modların gücü fiberin merkezinde sıfıra yaklaşacaktı. Bu sebepten yuvarlak olmayan yapılar kullanılarak bu sorun çözülmektedir[18].

Birinci kılıfın çapını büyüterek, fibere daha fazla pompa girişi sağlanabilir. Ancak bu durumda daha uzun fiber kullanmak gerekir. Çünkü pompa emilimi, nüvenin kılıfa oranıyla doğru orantılı olarak artar. Daha uzun fiber kullanımı ise fiberlerde oldukça baskın olan doğrusal olmayan etkilerin doğmasına sebebiyet verir. Bu da diğer bölümlerde anlatılacak olan atım daraltmada büyük bir engel oluşturur.

Sinyalin tek modda ilerlemesini istememizin sebebi ise, işlem yapılacak noktada ışığın kalitesini belirleyen parametre olmasıdır. M^2 olarak ifade edilir. M^2 ideal ışık demeti için 1 kabul edilir ve 1 'den uzaklaştıkça ışık tek-modluktan yavaş yavaş çıkar. Fiber lazerin diğer lazer türlerine göre üstünlüğü de tek modda ışığın gücünü arttırabilmesidir.



Şekil 2.7. İki cladlı fotonik kristal fiber[46].



Şekil 2.8. İki kılıflı fiberlerin kaplama türleri [18].

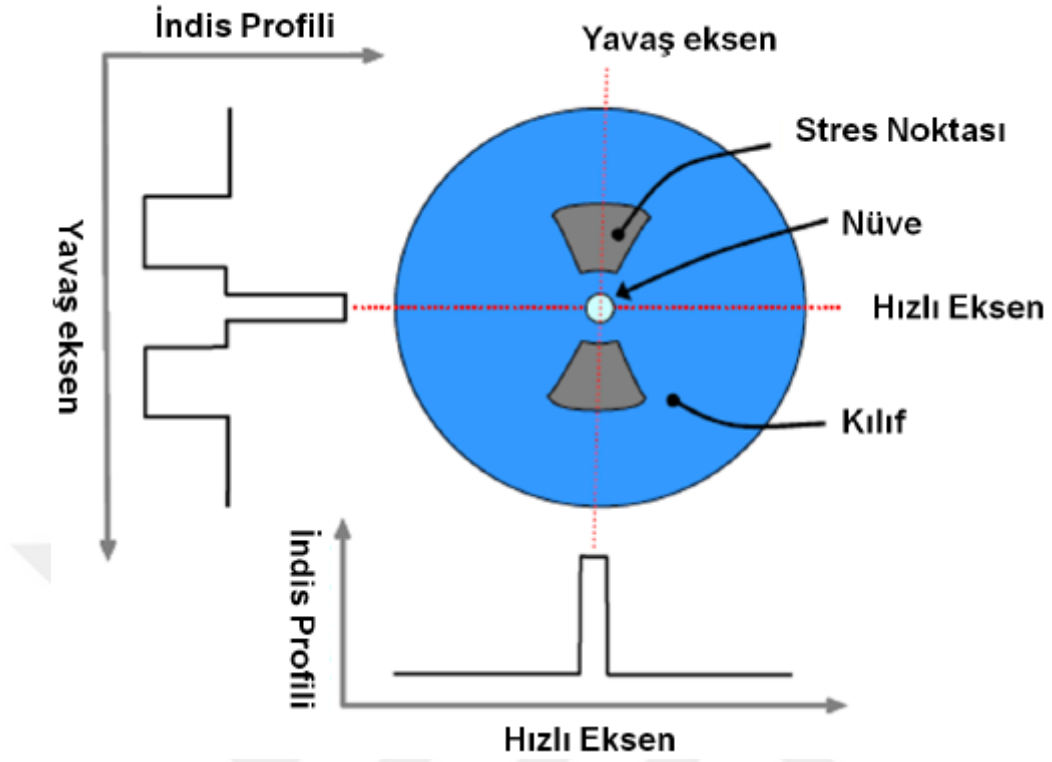
2.3.4 Kutuplama Koruyan Fiberler

Işığın kutuplanması elektrik alanını belirlemektedir. Işığın elektrik alanı eksenleri hızlı ve yavaş olmak üzere iki şekilde isimlendirilir. Bunların kombinasyonları da doğrusal, yuvarlak, eliptik gibi kutuplu veya kutupsuz olabilmektedir. Kutuplama koruyan fiberler tek-modlu fiber olmak zorundadır. Çünkü her bir modun kutuplanmasını aynı oranda optik fiberde desteklemek imkânsızdır. Kutuplama koruyan fiberlerin amacı ışığın giriş kutuplanmasını koruyarak optik fiber sonuna kadar taşınmasıdır. Kutuplama korumayan fiberlerde de bu durum aynen geçerlidir fakat bu tür fiberler çevresel etkilere oldukça duyarlıdır ve herhangi küçük bir eğilme veya sıcaklık değişiminden dahi hızlı ve yavaş eksenler sürekli eksen değiştirirler ve böylelikle ortalama hızları aynı kalmaktadır. Kutuplayıcı korumayan fiberlerde kutuplama değeri (polarization extinction ratio) 0dB olarak görülür. Bunun nedeni kutuplanmanın sürekli ve hızlı bir şekilde rastgele değişmesidir[46].

Kutuplama koruyan fiberlerdeki yavaş ve hızlı eksenlerin ayrılmasındaki sebep çift kırınım denilen bir prensiptir. Bu prensibe göre, optik fiberlerde iki farklı kırılma indisi meydana gelmektedir. Bu iki farklı kırılma indisi de farklı eksenlerin farklı hızlarda yol almasına olanak sağlar. Eğer eksenlerden biri yavaş ise bu yüksek kırılma indisine maruz kaldığı anlamına gelirken hızlı eksen ise düşük kırılma indise maruz kaldığı manasına gelir. Bu kırılma indisi farkı ise şekil 2.9' da gösterilen stres noktalarından dolayıdır. Bu kırılma indislerinin farkına bağlı olarak eksenler birbirleriyle etkileşim içerisindedirler. Bir optik fiberde çift kırınım değeri ne kadar düşüğe bu etkileşim de o kadar fazladır. Yani çift kırınım yavaş ve hızlı indislerin kutuplama koruyan fiberlerin ne kadar iyi kutuplama koruduğuna dair bir diğer parametresi ise geçme uzunluğu (beat length) parametresidir. Geçme uzunluğu eksenlerin optik fiberde ne kadar yol boyunca birbirleriyle etkileşim halinde olduğunu gösteren bir parametredir. Geçme uzunluğu dalgaboyuna bağlı bir parametre olup çift kırınım parametresi ile de ters orantılıdır.

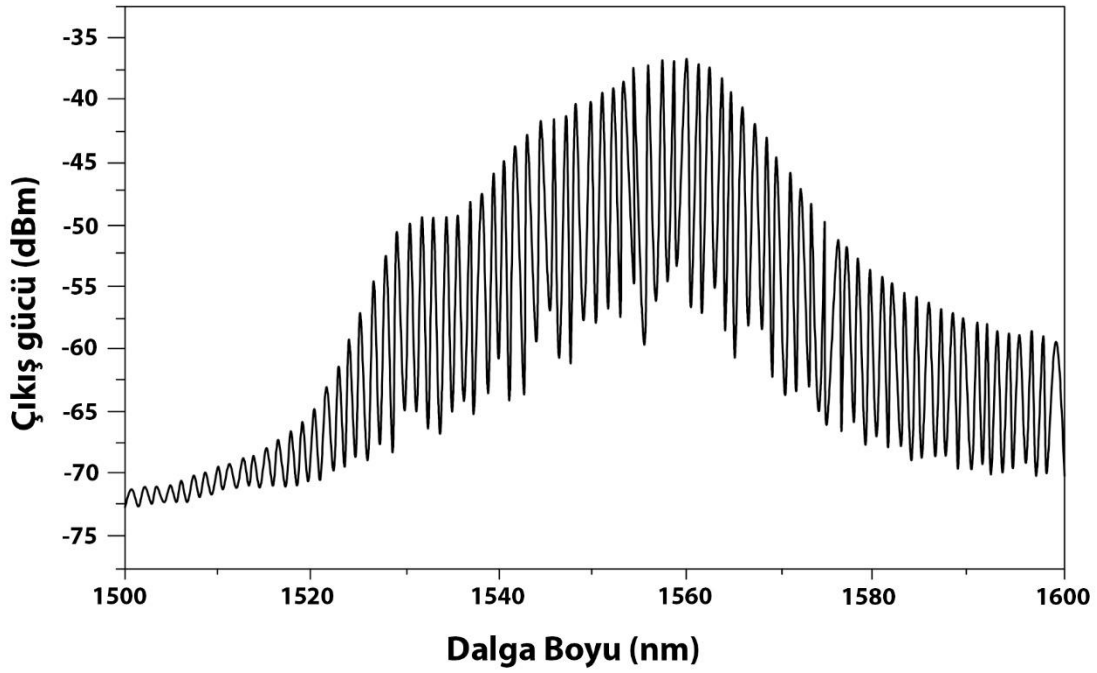
$$L_B = \lambda/B \quad (2.6)$$

$$B = n_{slow} - n_{fast} \quad (2.5)$$



Şekil 2.9. Kutuplamayı koruyan fiberlerin yapısı[46].

Kutuplama koruyan optik fiberlerin geçme uzunluğu değerleri basit bir düzeneyle ölçülebilir. Bunun için test edilecek olan kutuplama koruyan optik fiberin içerisine her iki eksen (hızlı ve yavaş) de yeterince güç olacak şekilde ışık gönderilir. Işığın geniş bir spektrumda olması ölçümdeki hataları minimuma indirecektir. Çünkü geçme uzunluğu ölçümünde hızlı eksen ile yavaş eksen birbirleri ile etkileşime girip girişim olayını gerçekleştirirler. Optik spektrum analizör çıkışına bakılırsa bu girişimler gözlemlenebilir.



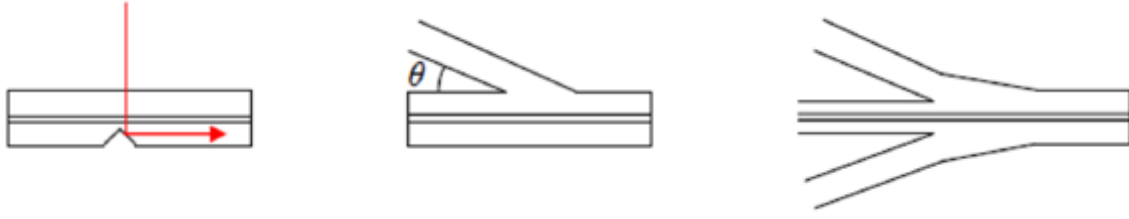
Şekil 2.10. Geçme uzunluğu ölçümünde spektrum çıkışı[46].

$$L_B = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} L \quad (2.7)$$

Bu formülde, $\Delta\lambda$ saçak aralığı, λ merkez dalgaboyu, L kutuplama koruyan optik fiber uzunluğu

2.4 Fiber Lazer Bileşenleri

Fiber lazer türünün diğer lazer türlerine göre en önemli özelliği ışığın fiber içerisinde ilerlemesini sağlayarak, herhangi bir hizalama zorunluluğunun olmamasıdır. Hizalama sorununun olmaması fiber lazerleri kompakt bir düzeye taşırken, ışığı istediğimiz yere taşımaya olanak sağlamaktadır. Işığın fiber dışına çıkmadan yoluna devam edebilmesi amacıyla fiber lazer sistemleri için bazı bileşenler üretilmiştir. Bunlar en basit yapıda olan ayırıcılardan, en komplike olan akusto-optik modülatörlere kadar yapılacak işleme göre çeşitlilik göstermektedir. Bu kısımda, fiber lazer güçlendirici sistemlerine özel bileşenler anlatılacaktır.



Şekil 2.11. Çentik birleştirme, açılı birleştirme, incelterek birleştirme [19].

2.4.1 Pompa Birleştirici

Pompa birleştirici adından da anlaşılacağı gibi birçok pompa fiberinin bir araya getirilerek tek bir fiber üzerinde toplamasına yarayan bir bileşendir. Pompa fiber birleştirmenin birçok metodu (şekil 2.11) olsa da en geneli incelterek birleştirmedir. Fiberlerin hepsini tek bir fibere yerleştirmek için iki seçenek vardır. Birincisi, birleştirilecek tüm fiberleri içine alacak büyüklükte bir fiber ile birleştirmek diğeri ise birleştirilecek fiberleri incelterek daha küçük çapa indirilerek uygun çaptaki tek bir fiberle birleştirmektir. İkinci seçenek daha çok kullanılmaktadır. Birleştime verimliliği ise yüksek oranda fiberler arasındaki NA farkına bağlıdır. Yani pompa fiberlerinin NA'sı, tüm fiberleri birleştirdiğimiz fiberin NA'sından küçük veya eşit olması gerekir.

$$NA_{pump} \leq NA \quad (2.8)$$

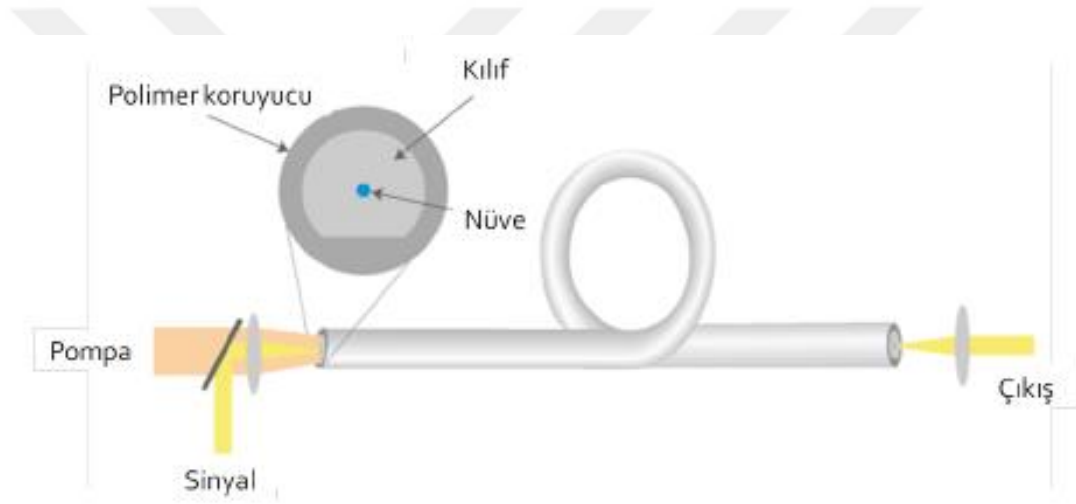
Birleştirilen fiberlerin çapları da formüle girerse

$$d_b NA_{pump} \leq d_0 NA_0 \quad (2.9)$$

d_b inceltirme işlemi öncesindeki bütün fiberlerin toplam çapı, NA_0 fiberler içerisindeki en büyük NA, d_0 ve NA_0 çıkış fiberinin çapı ve NA'sıdır. Mesela, 125 μm 'ye ve 0.15 NA 'ya sahip kaç fiber, 125 μm ve NA 'sı 0.46 olan çıkış fiberine fazla kayıp olmadan birleştirilebilir. Hesap yapıldığı zaman 9 veya daha az fiberle bu işlemin yapılabileceği sonucuna varılır. Aşağıda birkaç pompa birleştirici yapısı tablo 2.1' de verilmiştir.

Tablo 2.1. Birkaç pompa birleştirici yapısı [19].

Giriş / Çıkış Fiberi	125 μm 0.46NA	250 μm 0.46NA	400 μm 0.46NA
105/125 μm 0.15NA	7x1	19x1	61x1
105/125 μm 0.22NA	4x1	7x1	37x1
200/220 μm 0.22NA	1x1	4x1	7x1
400/440 μm 0.22NA	-	1x1	3x1



Şekil 2.12. Pompa ve sinyal birleştirici bileşen şematığı[46].

2.4.2 Pompa ve Sinyal Birleştirici

Pompa ve sinyal birleştirici bileşeni, pompa birleştirici bileşenine çok benzemektedir (şekil 2.12). Tek farkı pompa fiberler bütünüünün içerisinde sinyal fiberinde olmasıdır. Pompa ile sinyal fiberleri bir bütün haline getirileceği için genellikle bu bütüne birleştirilen fiber iki kılıflı fiber olmaktadır iki kılıflı fiberlerde sinyal merkezden yol aldığı için sinyal fiberini pompa fiberlerinin arasında olacak şekilde pompa fiberlerinin tam merkezine yerleştirmek gerekir. Böylelikle sinyal iki kılıflı fiberle birleşince iki kılıflı fiberin nüve kısmında yol alacaktır ve sinyalin çoklu moda geçişi engellenmiş olacaktır[46].

2.4.3 Akusto-Optik Modölatör

Akusto-optik modölatör akusto optik etkiyi kullanarak ışığı kırarak dağıtmak veya ışığın frekansını kaydırmak için kullanılan bir bileşendir. Genellikle bu tür



Şekil 2.13. Basit bir akusto-optik modölatör şematığı [24].

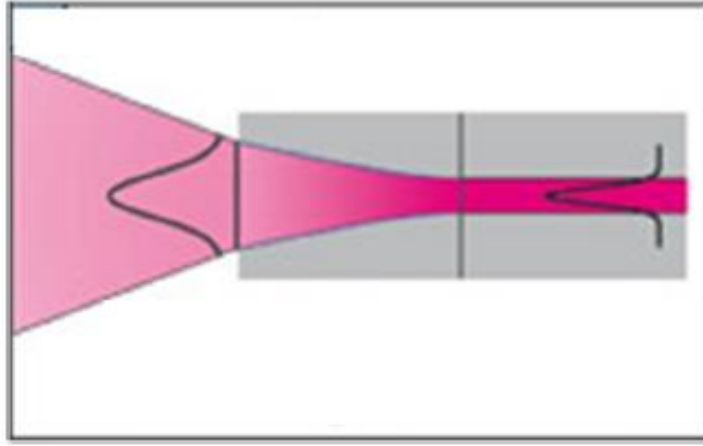
işlemler için ses dalgaları kullanılır. Sinyal modüle etmek için veya spektroskopi için frekans kontrol etmede kullanılır[20].

Yapısında bir adet piezoelektrik transdüser bulunur ve bu kristal bir yapıya tutturulmuştur (Şekil 2.13). Megahertzler mertebesinde bir radyo frekansında olan elektriksel bir sinyal aktarıcıyı titretilir ve kristalde ses dalgaları oluşur. Kristal yüzeyindeki genişlemeler veya daralmalar sonucu kristalin kırılma indisi değişir. Böylelikle sinyal başka yöne kırılarak dağılmış olur.

2.4.4 Çıkış Fiber Adaptörü

Çıkış fiber adaptörü birim alana gelen yüksek güç veya enerjiyi daha geniş bir alana yayarak fiberlerde gerçekleşmesi muhtemel zararları engellemek için kullanılır (Şekil 2.14).

Çıkış fiber adaptörünün genel fiberlerden farkı nüve kısmına sahip olmamalarıdır. Bu fiber birleştirmede oldukça avantaj sağlamaktadır[46].



Şekil 2.14. Fiber çıkış adaptörü şematığı[46].

2.4.5 Optik Yalıtıcı Bileşeni

Optik yalıtıcı bileşenler, ışığın tek yönlü geçmesine olanak sağlayan bileşenlerdir. Bu tür bileşenler lazer kavitesi içerisinde, geri dönen ışığın zarar verebileceği kısımlardan hemen sonra veya kavite gibi iki yönlü ışığın olduğu noktalarda istenmeyen dalga boylarındaki ışığı engellemek için kullanılırlar. Bu tür bileşenlerde Faraday çevirici (Faraday Rotator) adı verilen bir mekanizma kullanılır[22].

Faraday çevirici mekanizmasının çalışma prensibi, magnetik alanın ışığın kutuplanmasını değiştirmesine bağlıdır.

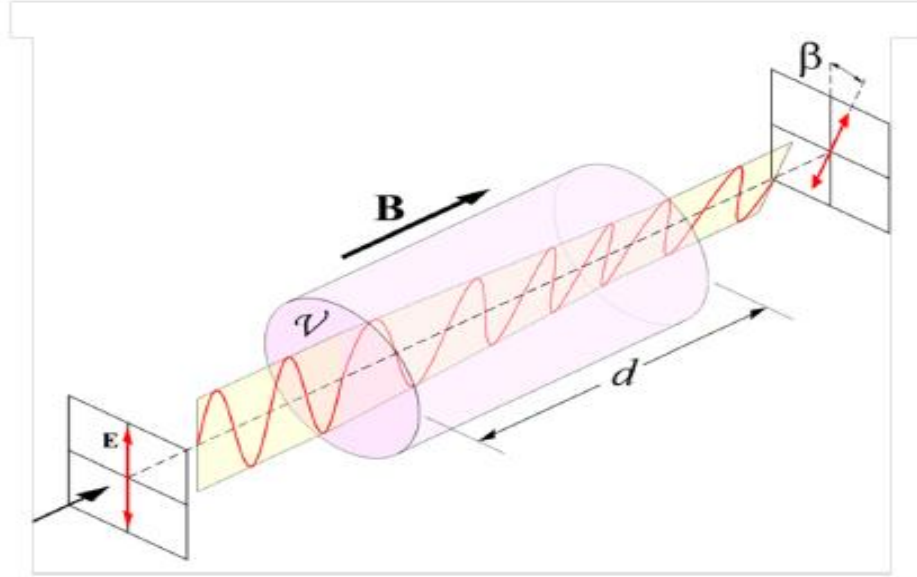
$$\beta = vBd \quad (2.10)$$

β kutuplanmanın dönüş açısı, v Verdet sabiti (malzemedan malzemeye göre değişkenlik göstermektedir.), B magnetik alan, d magnetik alanın uygulanan uzunluğudur.

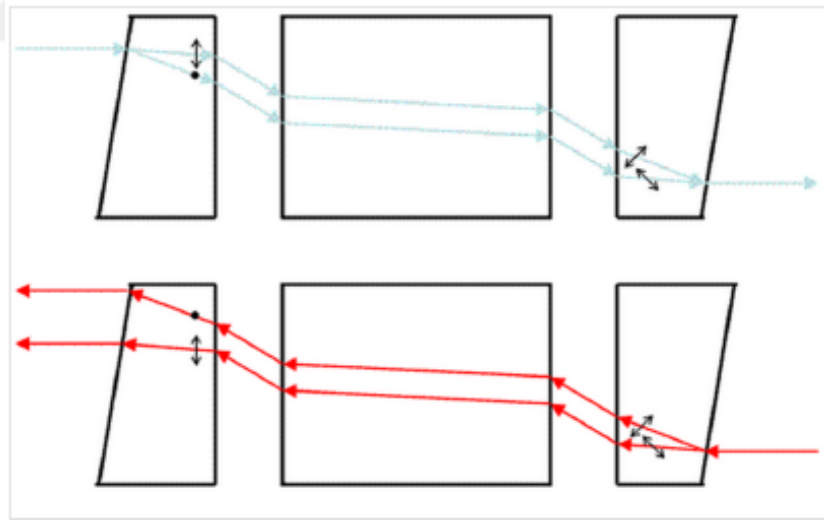
İki çeşit optik yalıtıcı bileşeni bulunur. Biri kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşenler (Şekil 2.15), diğeri ise kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerdir (Şekil 2.16).

Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerde gelen ışığın, optik yalıtıcıya gelmeden önce doğrusal kutuplanması gerekmektedir. Şekil 2.15'de görüldüğü gibi doğrusal kutuplanma ile gelen ışığın kutuplanması faraday çevirici bölgesinde 45° döndürülerek yalıtıcıdan çıkması sağlanır. Geri dönen ışık 45° dönmüş kutuplanmaya sahip olduğu için tekrar Faraday çevirici bölgesinden geçince kutuplanmanın yönü değişerek

yalıtıcının girişine gelir. Burada bulunan kutuplayıcı aynı yönde olmadığı için bu kutuplanmayı geçirmez ve yalıtım sağlanmış olur[23].



Şekil 2.15. Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşen [46].



Şekil 2.16. Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşen [30].

Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerde ise gelen ışığın hızlı ve yavaş eksenleri, ilk çift kırınım yarığında farklı açılarda kırılırlar. Faraday çevirici bölgesinde bu kutuplanmalar 45° döndürülür. İkinci çift kırınım yarığında ise ışıklar toparlanarak yalıtıcı bileşeninden dışarı çıkarlar. Geri gelen ışık aynı yolları tekrar geçtiğinde optik yalıtıcı bileşenin girişine gelmez ve yalıtım sağlanmış olur[23].

3. LASER IŞINI İLE KESME VE DELME

Laser grubu hemen hemen paralel TEM₀₀-modlu çan eğrisine uygun enerji dağılımı ile üretilir. Dış büyü optikler, laser ışınını kesme kafasına kadar taşıyıp, bu bölgede ışını odaklayarak malzeme yüzeyine iletirler. Gönderilen yüksek güç yoğunluğu malzemenin ısınmasını ve çok hızlı bir şekilde ergimesini sağlamaktadır. Sistem içinde (koaksiyel), laser kafasından kesme yüzeyine verilen gaz, bir yandarı laser ile kesme işleminde malzemeyi ortam gazlarından korumakta, bir yandan da kesilen yüzeyden malzeme taşınımı sağlamaktadır (Şekil 3.1) [33].

Kesilen kısımdan malzemenin uzaklaştırılmasına göre üç farklı laser ile kesme yöntemi mevcuttur ve bu kesme yöntemleri işlem görece malzemeye göre belirlenmektedir [25].

- Süblimleştirme ile kesme
- Yakarak kesme
- Ergiterek kesme

Günümüzde özellikle otomotiv, gemi ve uçak endüstrilerinde laser kesme işlemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında geleneksel kesme yöntemlerine göre çok daha az malzeme kaybı, çok dar tolerans aralıklarında kesme kabiliyeti ve kesmeden kaynaklanan ısı etkilerinin parçalarda oluşturduğu distorsiyonun ihmal edilecek düzeyde olması, laser ile kesme işleminin pek çok endüstri kolunda tercih edilerek yaygınlaşmasını sağlamaktadır[26-28]. Hatta metal dışı malzemelerin de laser ile kesilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır[29].

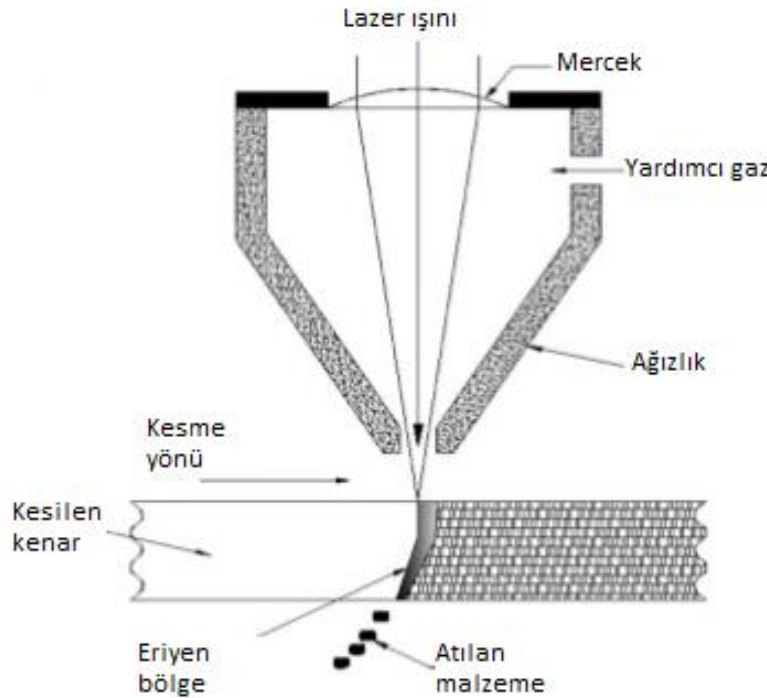
Laser kesme, genel anlamda malzemenin ergime veya buharlaşma sıcaklığına çıkılarak yapılan bir işlem olduğundan, enerji çok küçük bir odaklama ile yoğunlaştırılarak bu sıcaklıklara çıkılabilmektedir. Böylesi bir durum, bütün türleri için geçerli olmak üzere 20 mm'den kalın çelik parçalarını bile çok yüksek enerji seviyesine ihtiyaç duyulmadan laser ile kesilmesini mümkün kılmaktadır[30].

Laser kesmede, laser üreticinden (rezonatör) çıkan ışın, bir mercek sistemi ile odaklanarak yaklaşık 0,2 mm çapına düşürülür. Böylesi küçük çapta bir odaklama ile yakalaşık $1,4 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ kadar yüksek bir enerji yoğunluğunun, oluşumu sağlanarak, bütün malzemeler için geçerli olmak üzere buharlaşma fazına dönüşecek kadar sıcaklık elde edilir[31].

Endüstride, laser kesme işlemleri için daha ucuz olduğundan, yaygın olarak CO₂ laseri kullanılmaktadır. Ancak her malzemenin sadece CO₂ laseri ile kesilmesi mümkün değildir.

Laser aktif malzemesine göre elde edilen laser dalga boylarının, malzemeler tarafından farklı değerlerde soğurulduğu bilinmektedir. Buna bağlı olarak laser kesmede de malzemelerin soğurma derecelerine bağlı olarak laser türü belirlerlenmelidir; örneğin CO₂ laseri ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) genellikle çeliklerin kesilmesinde kullanılırken. Bakır ve alüminyum gibi malzemelerin soğurma değerlerine göre Nd:YAG laseri ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) ile kesilmesi mümkündür[33].

Laser türünün yanında kullanılan gazın da kesilen malzemeye göre seçiminin önemi büyüktür. Genellikle kompozitlerin veya demir dışı metallerin kesilmesinde soygazlar kullanılırken, çeliğin kesilmesinde oksijen kullanılmaktadır. Oksijen kesme sırasında ısı veren (ekzotermik) tepkime oluşturduğundan, kesme bölgesindeki sıcaklığı artırmakta ve aynı zamanda kesim bölgesinden malzeme taşınımını sağlamaktadır. Şekil 3.1, tipik laser kesme sisteminin fotoğrafını ve laser kesme kafasını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 3.1. Laser kesme kafasının şematik şekli [32].

3.1 Laser İle Kesme

3.1.1 Laser İle Süblimleştirerek Kesme

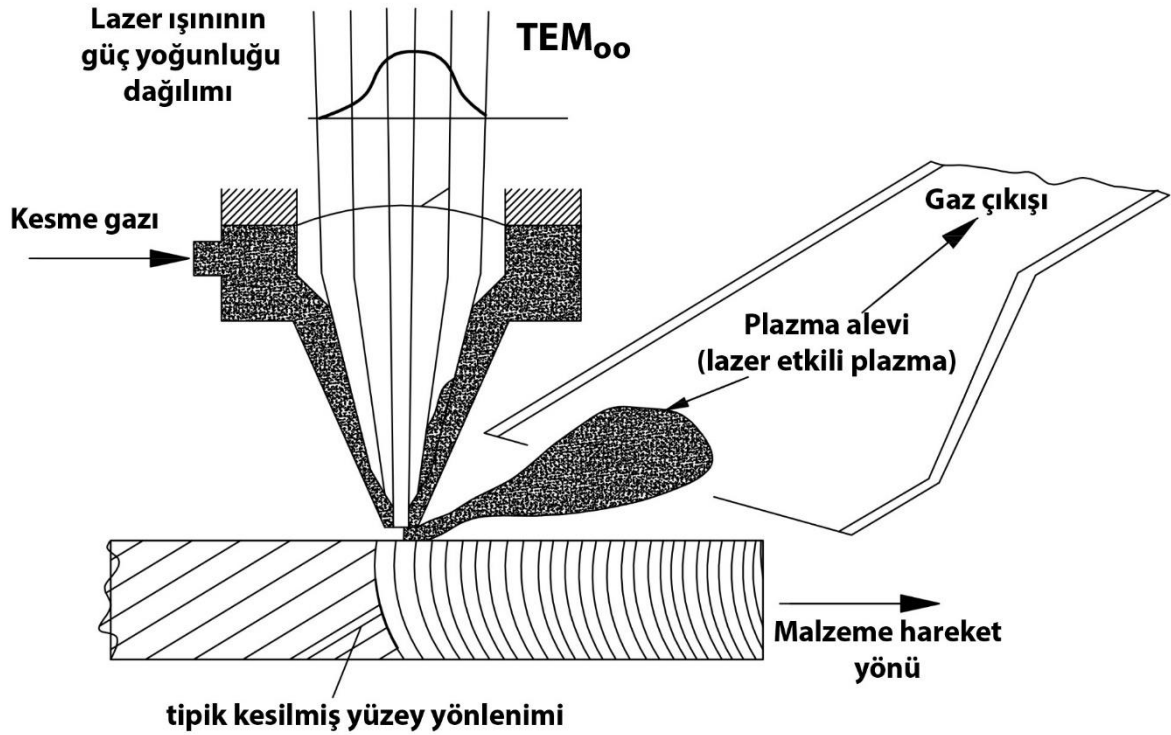
Süblimleştirme ile kesmede malzeme laser ışınının etkisi ile kesme kafası önünde doğrudan buharlaşmaktadır (Şekil 3.2). Bu tür kesme yöntemi, katı-ergiyik geçiş fazı tam belirgin olmayan veya ergiyik halde çok dar sınırlarda kalan, tahta, kağıt, seramik ve plastik gibi malzemelerde gerçekleştirilebilmektedir[33].

Bu yöntemde darbeli laser ile metallerin kesilmesinde çok yüksek bir laser güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Laser ışını - malzeme arasındaki etkileşim bölgesinde oluşan ergiyik faz alanında ısı kayıpları minimum azaltılabilmektedir. Kalın parçaların kesilmesi bu yöntemle uygun değildir; çünkü buharlaşan malzeme, kesme sırasında oluşan kapiler aralığı tekrar kapatmaktadır[33].

Bu yöntemde hemen hemen ergime olmamakta ve ilave gazın yardımı ile parlak bir kesim yüzeyi elde edilebilmektedir. Yüksek ve genellikle darbeli verilen enerji, çok dar bir ısı etkisi altında kalan bölge (ITAB) oluşturmaktadır. Kesilen kenarlarda oksidasyon oluşmamakta ve böylece malzemenin kesme aşamasından sonraki kullanımında, geleneksel yöntemlerle kesilmiş malzemelere göre bir üstün özellik sağlanmaktadır. Genel anlamda süblimleştirme ile metallerin kesilmesinde kabul edilebilir kesme kenar ve yüzeyleri elde edilmektedir. Buna karşın bazı durumlarda kesme yüzeylerinde yanma lekesi gibi hatalar görülebilmektedir[33].

Bu üstün yönlerine karşın, süblimleştirme ile kesmeyi sınırlayan faktörler aşağıda özetlenmiştir:

- Süblimleştirme ile kesme hızı, eriterek kesme hızına göre çok yavaştır. Metalsel malzemelerde bu yöntemle kesme çok dar kalınlıklarda yapılabilen ve yaklaşık 1 mm kalınlığından daha ince parçalar kesilebilmektedir.
- Odaklama yerine göre, eğer kesme işlemi malzemenin içinde başlatılmışsa, oluşan plazma bulutu malzemeyi de etkileyerek kesme yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açabilmektedir. Böylesi tehlikeli bir metal buharının ortamdaki uzaklaştırılması için, işletmelerde bir filtre sisteminin kurulması şarttır[33].



Şekil 3.2. Laser-süblimleştirme kesme sistemi; kesme gazı laser sistemi içinden (koaksiyel) malzemeye yönlendirilmektedir [25].

3.1.2 Laser İle Yakarak Kesme

Bu yöntem, metallerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında oksijen, ilave kesme gazı olarak laser kesme kafasının yanından verilmektedir (Şekil 3.3).

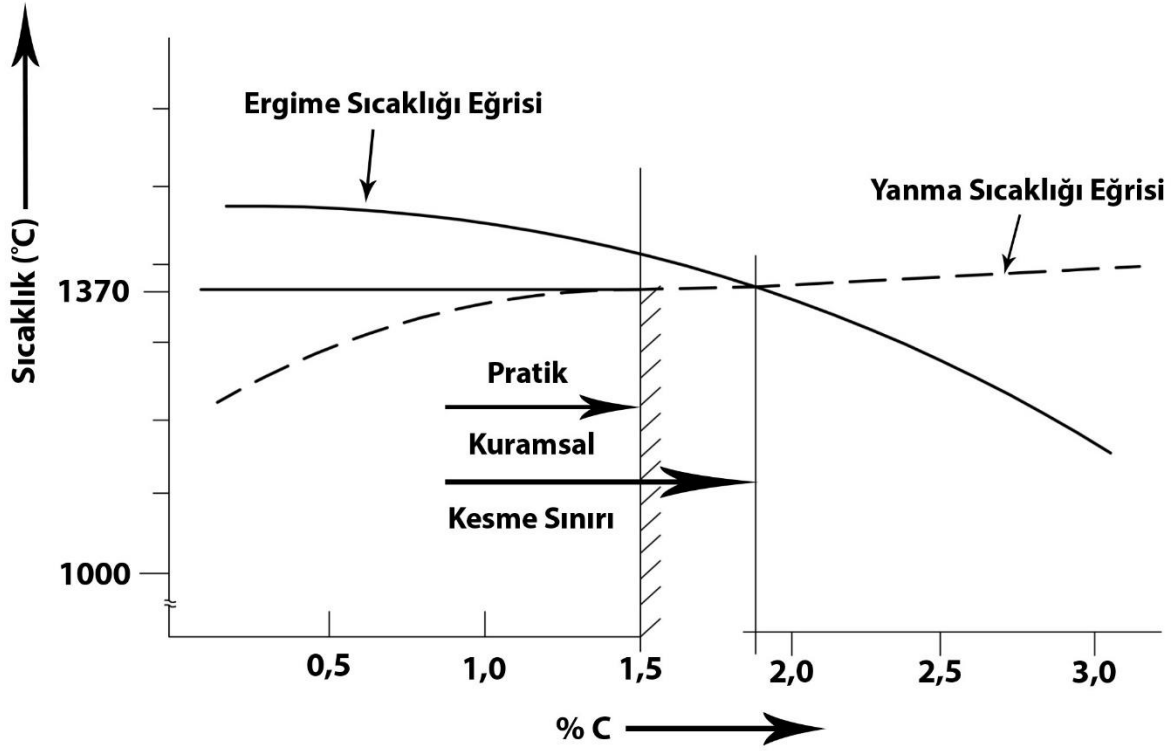
Oksijen etkisi ile kesme bölgesinde oluşan ekzotermik (dışarıya ısı veren) tepkime, laser ışımından daha yüksek bir ısı gücü oluşturmaktadır[33].

Ulaşılan kesme hızları, 6 - 8 faktör arasında yer almakta olup, ergiterek kesme yönteminden daha hızlı bir yöntemdir. Yöntemin esası, laser ışınının sınırlandırılmış bir bölgeyi ön ısıtması ve bu bölgede malzemeye enerji taşımasına dayanmaktadır.

Alaşımsız bir çeliğin yakarak kesilmesindeki aşamalar aşağıda verilmiştir:

- Çeliğin ön ısıtılması
- Fe ve C kısımlarının yanması
- Akıcı curufun kesme yüzeyinden uzaklaştırılması
- Işının veya malzemenin hareketi ile parçanın kesilmesi [33]

kullanılmaktadır; özellikle görece kalın levhaların kesilmesi, ergiterek veya süblimleştirerek kesmeye göre daha yaygındır. Ayrıca bu yöntemde daha yüksek kesme hızlarına ulaşılabilmektedir. Buna karşın yöntemin üstün olmayan yönleri; oksijenin kesme kenarında bir oksit filmi oluşturması ve burgaç halindeki ergiyik banyonun kesme alanında ergiterek kesmeden daha güçlü bir kesme izi oluşturmasıdır[33].



Şekil 3.4. Alaşımsız bir çelikte c miktarına bağlı olarak kuramsal ve pratik kesme sınır değerleri [25].

3.1.3 Lazer İle Ergiterek Kesme

Ergiterek kesmede ana unsur malzemenin ergiyik fazda kalma süresidir. Bu ergiyik kısım kesme kafası aracılığı ile ortamdan uzaklaştırılmaktadır. İlave gaz malzemesi olarak genellikle inert azot (N_2) veya argon (Ar) kullanılmaktadır, CO_2 laseri TEM_{00} -modu ile bir enerji oluşumunu gerçekleştirmekte veya sürekli bir laser oluşumunu gerekli kılmaktadır. Bu yöntem ile kesilen tipik malzemeler, amorf davranış sergileyen cam ve plastikler ve özellikle metallerdir.

Yüksek sıcaklıkta ergiyen malzemelerin bütün türlerinde bölgesel yüksek bir enerji yoğunluğu (TEM_{00}) kullanılmaktadır. Kısa sürede ergimesi gerçekleştirilen böylesi

malzemelerde koruyucu gaz ile birlikte kesme işlemi yapılmaktadır ve kesme işlemi gerçekleştirilirken uygun yüksek bir gaz basıncı uygulanmaktadır.

Standartlaştırılmış bir ergiterek kesme işleminde;

- Malzemenin buharlaşmasına olanak tanınmayacak zamanda işlem yapılmalıdır.
 - Argon gibi soygazlar kesme kenarında oksidasyon oluşumunu engellemektedir.
 - Yakarak kesme ile karşılaştırıldığında kesme hızı daha düşüktür.
 - Yüksek alaşımlı çelikler dahil, bütün metallerin kesilmesi bu yöntemle mümkündür.
- [33]

3.2 Yüksek Basıncılı Kesme

6 barın üzerinde uygulanan gaz basıncında yapılan kesme işlemi, yüksek basınçlı kesme olarak adlandırılmaktadır. Böylesi yüksek bir gaz basıncı, parçada ergiyen kısmın çok daha yüksek bir hızla kesme kafasından uzaklaşmasına ve kesilen yüzeyde tabakalı (laminar) bir kesme yüzeyinin oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca basıncın etkisi ile kesme kenarında malzemeye tutulan curuf tamamen uzaklaştırılabilmektedir. Kesme gazı olarak azot kullanıldığından yüksek alaşımlı çelikler ve alüminyum alaşımları dahil olmak üzere, metallerin kesme yüzeylerinde oksit filmi oluşmamaktadır. İşlem hızı, yakarak kesmede elde edilen kesme hızlarından kullanılan soygaz nedeni ile daha düşüktür[33].

3.2.1 Yassı Ürünler

Düz veya düz olmayan yassı ürünlerin laser ışını ile işlenmesinde geniş yassı kafes yapıların, plakaların ve bantların ve parça kalınlığına bağlı olarak, kalın sacların, ince sacların ve çok ince sacların işlenmesi veya kesilmesi şeklinde sınıflandırma yapılmaktadır. Başka bir yassı ürün sınıflandırmasında, alüminyum veya bakır plakaların veya metal dışı malzemelerin, örneğin PVC plakaların kesilmesi veya işlenmesi de laser ışını ile mümkün olmaktadır. Sacların kalitesi kullanım amacına uygun olarak belirlenmektedir. Kalın saclar A ve B şeklinde sınıflandırılıp, kalınlıkları 3 mm'nin üzerindedir. İnce saclar, 0,5 - 3 mm aralığındaki kalınlıklara sahipken, çok ince saclar ise 0,5 mm'nin altındaki kalınlıkta olurlar. İnce saclar, yumuşak alaşımsız çelikler (yaklaşık %0,1 C) ve genel yapı çelikleri (yaklaşık %0,2 - 0,7 C) şeklinde üretilmektedirler. Bu çeliklerin korozyon dayanımları olmadığından

genellikle kullanım yerine göre yüzey kaplamalı biçimde kullanılmaktadırlar. Bu çeliklerin laser ışını ile kesilmesinde ergiyik ve buhar fazı olacağından, yüzey koruma veya dekoratif amaçlı bulunan kaplama malzemesi, kesme işlemi sırasında ortamdan ayrılmaktadır. Bu nedenle işlem sonrasında kesilen yüzeylerde kaplama öncesindeki gibi korozyon dayanımı yoktur[33].

3.2.2 Asal Çelikler

Yassı ürünlerin büyük bir kısmı korozyona dayanımlı malzemelerden üretilmektedirler. Korozyon dayanımı için %12 Cr yeterli olmasına karşın, korozyona dayanıklı yassı ürünlerde parlak bir yüzey eldesi için en az %14 Cr bulunması gerekmektedir. Genellikle diğer metaller ile alaşımlandırma yapılarak daha yüksek mekanik özellikler ve yüzey özellikleri sağlanmaktadır. Böylesi çelikler genellikle Ni ilavesi ile östenitik yapıda olup, yüksek dayanım ve düşük sıcaklıklarda özelliklerini koruma özelliği sergilemektedirler. Özellikle plaka olarak kullanılan türlerine, molibden ilavesi ile yüzeydeki oyuklanma korozyonuna karşı dayanım sağlanmaktadır.

Östenitik yapıda olan bu yüksek alaşımlı çeliklerin laser ışını ile kesilmesinde kaliteli bir kesim yüzeyi elde edilebilmek için, sadece yüksek basınç altında laser ışını ile işlem yapılmalıdır[33].

3.2.3 Demir Dışı Metaller

Demir dışı metaller arasında yaygın olarak kullanılan alüminyum. Bir yandan hafifliği ve diğer yandan iyi şekil alabilirliği nedeni ile özellikle otomobil sektöründe yükselen bir eğilim göstermektedir. Alüminyum alaşımlarının laser ışını ile kesilmesindeki en büyük sorun yüzeyin yansıtma özellikleridir. Söz konusu sorunun aşılması ve istenilen kesme yüzeylerine ulaşılabilmesi için yüksek basınçlı laser kesme işlemi yapılması gerekmektedir[33].

3.2.4 Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin,

- Partikül takviyeli kompozitler
- Elyaf takviyeli kompozitler
- Tabakalı kompozitler

olmak üzere üç türü bulunmaktadır. Matris malzemesi metal, seramik ve plastik olmak üzere kendi arasında tekrar üç türe ayrılmaktadır.

Matrisin ve takviye elemanının ergime sıcaklıkları arasındaki farklar nedeni ile kompozitlerin işlemi oldukça zordur. Matris içinde bulunan farklı takviye elemanlarının varlığı, kompozitlerin laser ışını ile kesilmesini daha da zorlaştırmaktadır. Bütün kompozit malzemelerin laser ışını ile kesimi süblimleştirme ile kesme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmektedir[33].

3.3 Kesilen Yüzeyin Değerlendirilmesi

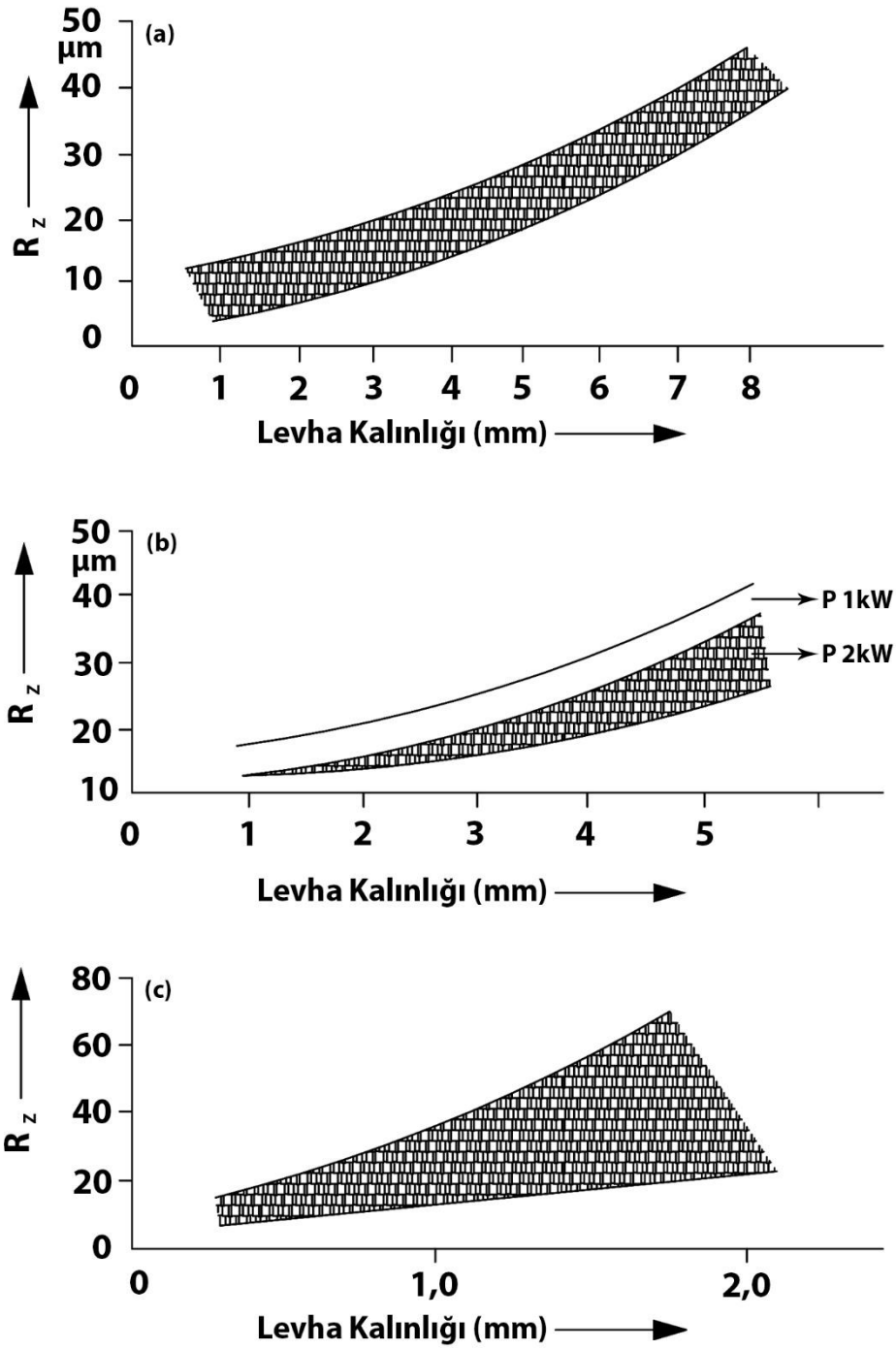
Kesilmiş yüzeyin değerlendirilmesinde en önemli faktör ısı taşınımıdır. Ayrıca, kesim yüzeyinden başlayarak malzemeye doğru ilerleyen ısı etkisi altında kalan alan da değerlendirme içine alınmalıdır. Çalışan elemanların mümkün olduğunca büyük şekil ve kütle farklılıkları olmamalıdır. Kesim yüzeylerindeki şekil farklılıkları küçük boyutta tutularak, son işleme gerek duyulmadan daha sonraki işlemleri gerçekleştirmek mümkündür. DIN 2310 standardına göre kesilen yüzeyler için aşağıdaki kriterler önemlidir:

- Dik açılılığı ve eğim toleransı
- Ergime açısı
- Ortalama pürüzlülük derinliği

Geometrik ideal yüzey, konstriksiyona bağlı olarak saptanmaktadır. Yüzeydeki toplam farklılık şekillenme farklılığı olarak tanımlanmaktadır[33].

3.3.1 Pürüzlülüğün Değerlendirilmesi

DIN 2310'a göre, laser ışını ile yakarak kesme yönteminde kalınlığı 2 mm'ye kadar olan plakaların ortalama pürüzlülük derinliği kesilen yüzeyin ortasından, daha kalın plakalarda ise ışının girdiği kenardan itibaren 2/3 uzaklığında ölçülür[33].



Şekil 3.5. Laser ışını ile kesilmiş farklı malzemelerde kesilen yüzeylerde ortaya çıkan pürüzlülük değerleri R_z ; (a) alaşımsız çelik, (b) yüksek alaşımlı çelik ve (c) alüminyum alaşımı. [25]

Yakarak kesme yönteminde çizgi derinlikleri için pek çok kalite sınıflandırılması yapılmıştır. Teknik çizimlerde bunlar kesikli çizgiler şeklinde verilir, pürüzlülük ve çizgi derinlikleri küçük harfler ile kodlanmaktadır. Tüm pürüzlülük ölçüm büyüklükleri,

pürüzlülük profilinden elde edilmekte ve μm olarak verilmektedir. Anılan bu pürüzlülük değerleri yüzey ölçüm aletleri ile saptanmaktadır. Yüzey kalitesi malzemeye ve seçilen bitirme işlemlerine doğrudan bağlıdır. Farklı parametreler ile laser ışını kullanılarak kesilmiş olan alaşımsız çelik, yüksek alaşımlı çelik ve alüminyum alaşımları için yüzey pürüzlülük değerlerine ait değerler Şekil 3.5'te verilmiştir[33].

3.3.2 İz Genişliği

Kesme sonrası oluşan kesme izlerinin genişlikleri, birbirleri arasındaki uzaklık ölçülerek tespit edilir. Görülebilir izler kesme hızından çok, kullanılan kesme yöntemine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle yakarak kesme yönteminde kesme izi görülürken, plastiklerin ergitme yöntemi ile kesilmesinde parlak bir yüzey elde edilir[33].

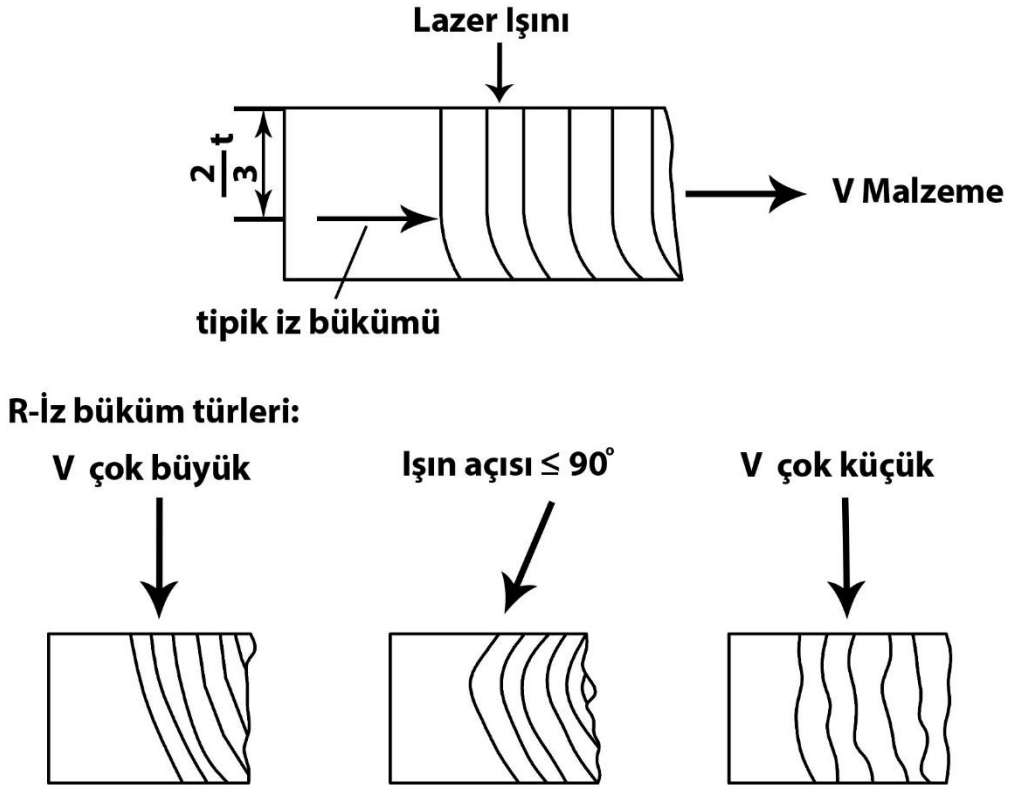
3.3.3 İz Şekli

Şekil 3.6, farklı türde oluşan iz şekillerini şematik olarak göstermektedir. oluşan bütün izler laser ışınının malzemeye girdiği kenardan başlayıp, malzemenin alt kenarına kadar devam etmektedir. izlerin oluşum şekli, laser ışını polarizasyonunun yanında birinci derecede işlem hızına (malzemenin hareket hızına) bağlıdır[33].

Kesme izleri tipik olarak, laser ışınının malzemenin içine girdiği kenardan itibaren, parça kalınlığının $2/3$ oranındaki değere kadar birbirlerine paralel oluşmakta ve bu değerden sonra parçanın geri kalan $1/3$ 'ünde büküm göstermektedirler[33].

Tipik oluşan iz şekillerinden farklı bir biçimde ortaya çıkan ve beklenen iz değerlerinin dışında oluşan kesme izleri, laser gücünün ve gaz basıncının çok düşük, kesme hızının ise çok yüksek seçilmesinden kaynaklanmaktadır[33].

Ayrıca ışının odaklanmasının, laserin geliş açısının ve mercekle ayarının uygun olmaması durumunda da, oluşan kesme izlerinin şekilleri tipik olmayıp, iz bükümü parça kalınlığının $2/3$ oranındaki değerinden önce ve çok farklı bir açı ile oluşabilmektedir. Hatta bazı durumlarda oluşan kesme izleri birbirlerine paralel olmamaktadır[33].



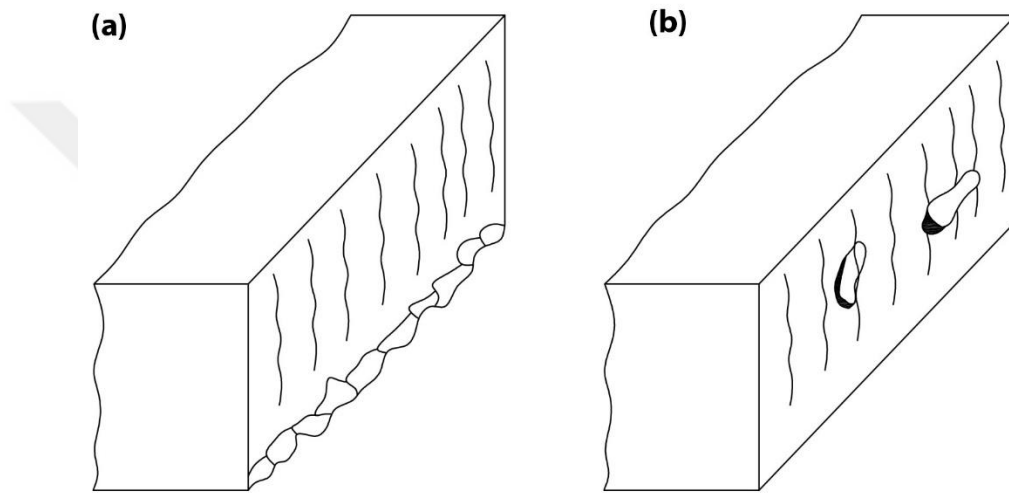
Şekil 3.6. Laser kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan iz şekilleri (şematik) [25].

3.3.4 Kesilen Yüzeyin Değerlendirilmesi

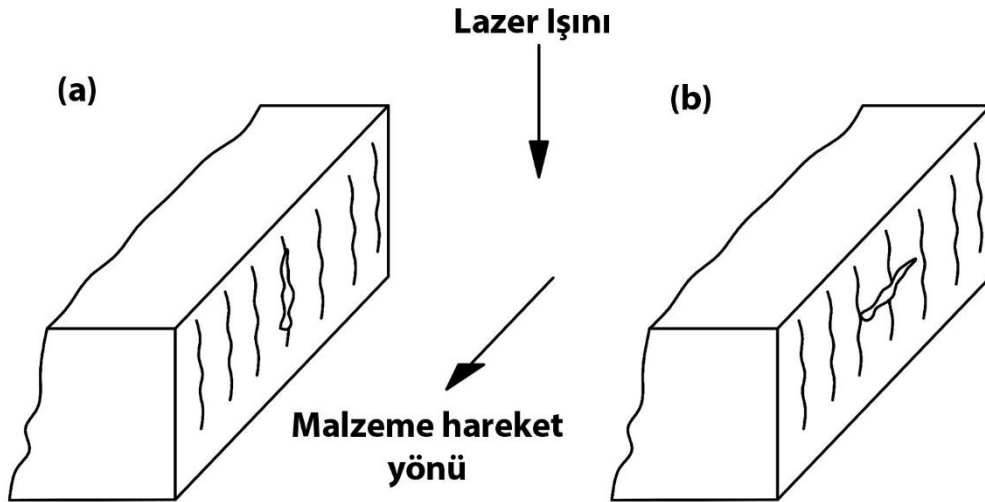
Laser ile kesilen parçaların yüzeyleri, kenar şekli, kesim geometrisi, kesilen yüzeydeki tümsek oluşumu, curuf oluşumu ve çatlak gibi oluşumlarla değerlendirilir. Laser ile kesilen yüzeyde kenar şeklinin, keskin kenarlı ve dik açılı olması istenmektedir. Parçaların ergiterek kesilmesi sırasında üst kenar ergimekte ve sonrasında bir açı oluşmaktadır. Plazma ile kesmede bu açı yaklaşık 3° olurken, laser ile kesmede üst kenardan alt kenara kadar herhangi bir açı oluşmadan paralel bir kesme elde edilebilmektedir. Kesme aralığı (kesilen yüzeyler arasındaki uzaklık), beklenen değerden büyükse, bu durum; genellikle odak uzaklığının veya laser ışınının yanlış odaklanmasının sonucunda oluşmaktadır[33].

Laser ile kesilen parçaların yüzeylerinin üst ve alt kenarlarında tipik olmayan kusurlar oluşmaktadır. Kesme gazının yanlış bir açı ile yönlendirilmesi ile gözenekli kesitlerin oluşumuna yol açılmaktadır. Oluşan kenar çökmeleri, seçilen düşük laser gücü veya çok yüksek gaz basıncı nedeniyledir. Bu oluşumun önlenmesi için gaz basıncının artırılması gerekmektedir (yüksek basınçlı kesme tercih edilmelidir). Laser ile kesmede curuf hem

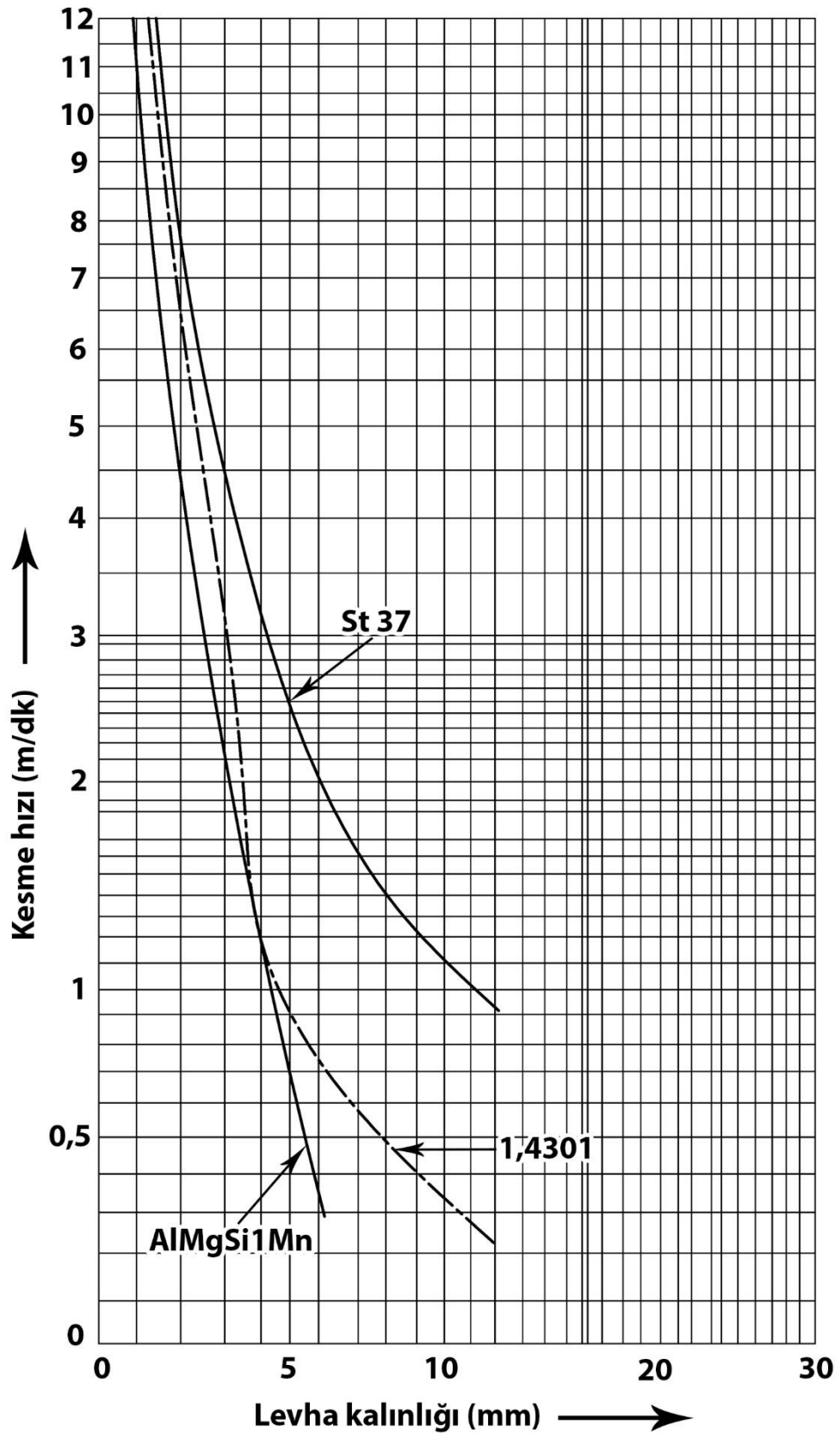
kesilen yüzeyin alt kenarında hem de yüzeyde oluşabilmektedir (Şekil 3.7). Curuf oluşumu (karbon çeliklerinde oluşan oksit film), laser ile kesme sırasında kullanılan azot veya argon gibi bir Soygaz ile azaltılabilmektedir. Ayrıca gaz basıncı ile vizkos sıvı ortamdan uzaklaştırılmalıdır. Kesme sırasında parçada yanma oluşmuşsa, bunun nedeni yüksek laser gücü ve düşük kesme hızı seçimidir. Malzeme kesme ısısından aşırı derecede etkilenmişse bir renklenme olmaktadır; bunun nedeni de benzer şekilde yüksek laser gücü, düşük kesme hızı ve düşük gaz basıncıdır. Kesilen yüzeyde oluşan çatlaklar ya kesme yüzeyine paralel ya da dik doğrultuda oluşmaktadır[33] (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Laser ile kesilen yüzeylerde oluşan curuf; (a) alt kenarda curuf oluşumu ve (b) kesilen yüzeyde curuf oluşumu (şematik) [25].

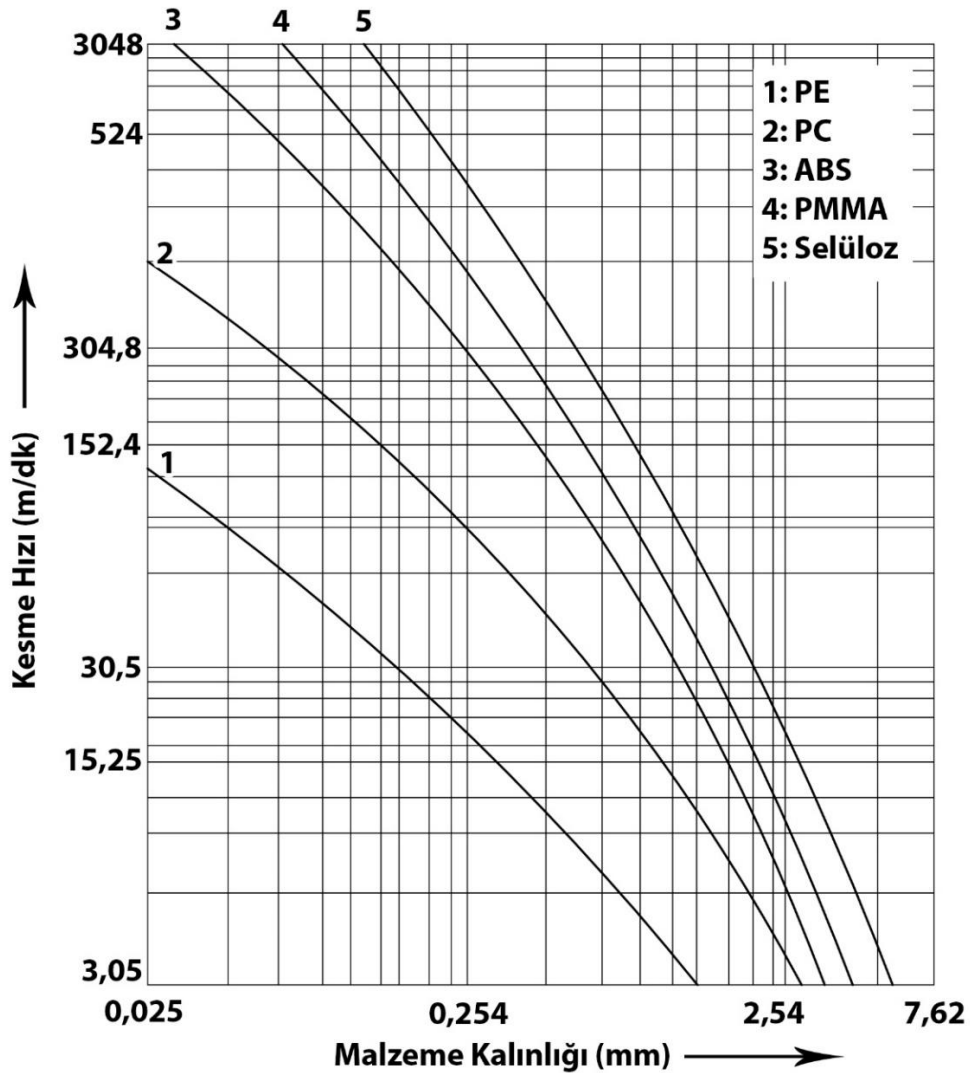


Şekil 3.8. Laser ile kesilen yüzeyde oluşan çatlak; (a) oluşan iz yönündeki çatlak ve (b) kesme yönünde oluşan çatlak (şematik) [25].



Şekil 3.9. Yapı çeliği, alüminyum ve krom-nikel çeliğinin 1500 w laser çıkış gücüne sahip laser sistemi ile yapılan laser kesmede, kalınlık - kesme hızı ilişkisi [25].

Laser ışını ile kesmede bir yandan malzemeye ve diğer yandan da parça kalınlığına bağlı olarak kesme hızları değişmektedir. Şekil 3.9'da yapı çeliği, alüminyum ve krom-nikel çeliği için laser ile kesmede parça kalınlıklarının artması ile kesme hızlarının düştüğü görülmektedir. Yapı çeliği, diğer iki malzemeye göre eşit kalınlıktaki parçalar için görece daha yüksek hızda laser ışını ile kesilebilmektedir. Alüminyum alaşımı için 4 mm' den daha kalın parçalarda kesme hızı, diğer iki malzemeye göre daha çok düşme göstermekte ve yaklaşık 6 mm levha kalınlığı için kesme hızı 0,2 m/dak. değerine düşmektedir. Şekil 4.10'da ise farklı polimerlerin kalınlıklarına bağlı olarak laser kesme hızındaki değişimi verilmiştir. [33]



Şekil 3.10. Farklı polimer malzemelerin laser ile kesilmesinde malzeme kalınlığı - laser kesme hızı arasındaki ilişki [25].

Genel olarak malzemelerin laser ışını ile kesilmesi ile geleneksel kesme yöntemleri karşılaştırıldığında, dar kesme aralığı, keskin kenar yüzeyleri ve çok düşük yüzey pürüzlülüğü eldesi mümkündür.

Laser ışını ile kesmede, laser gücü, laser modu ve ışın kalitesi gibi laser parametreleri ile, malzemenin ergime sıcaklığı, buharlaşma bölgesi, dönüşüm (allotropik yapısı) durumu, malzeme kalınlığı, ısı iletkenlik, laser ışınının soğurulma derecesi ve parça geometrisi gibi malzeme parametreleri

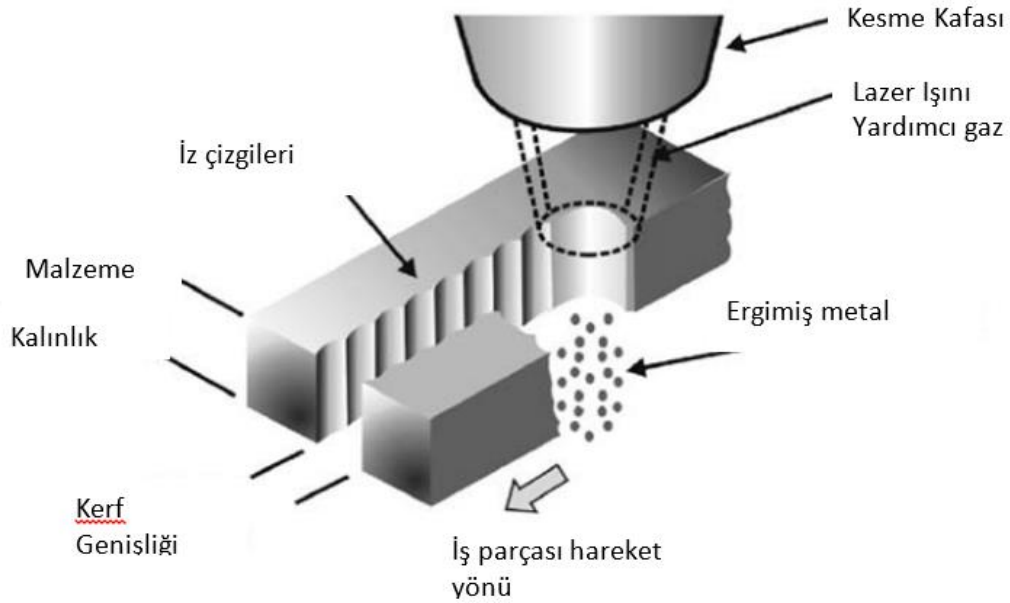
- Kesme hızı
- İlave gazları
- Laser ışını - yüzey arasındaki uzaklık
- Laser ışının yüzeye düşme açısı

gibi işlem parametrelerini birlikte etkilerler[33].

4. LAZER İŞİNİ İLE KESME YÖNTEMİ

4.1 Lazer İle Kesme İşleminde Karakteristik Yapı

Lazerle kesim işleminde yapılan kesme işleminin kalitesi; lazer etkisi ile kaldırılan malzemeden sonra kalan yüzeylerdeki parametrelerle yani lazerle kesmenin karakteristik özellikleri ile belirlenmektedir. Bu parametreler; çentik genişliği, kesim kenarlarının yüzey pürüzlülüğü, tolerans kontrolü, düzlemsellik, diklik kesme işlemi esnasında oluşan cüruf miktarı, ısı tesiri altında kalarak etkilenen bölgenin büyüklüğü vb. gibi özelliklerin ölçülmesiyle belirlenebilir. (Şekil; 4,1.) Farklı yöntemlerle elde edilen kesik yüzeyleri karşılaştırılırken bu parametreler mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Gelişen teknoloji ile birlikte geleneksel kesme yöntemlerinin yetersizlikleri (kesme kalitesi, kesme hassasiyeti, işlemin tekrar edilebilirliği, zaman vb.) bilinmektedir. Bu yüzden en hızlı, en kaliteli ve en düşük yüzey deformasyonunu en az maliyetle elde edebilmek için sürekli yeni yöntemler araştırılmaktadır[56].



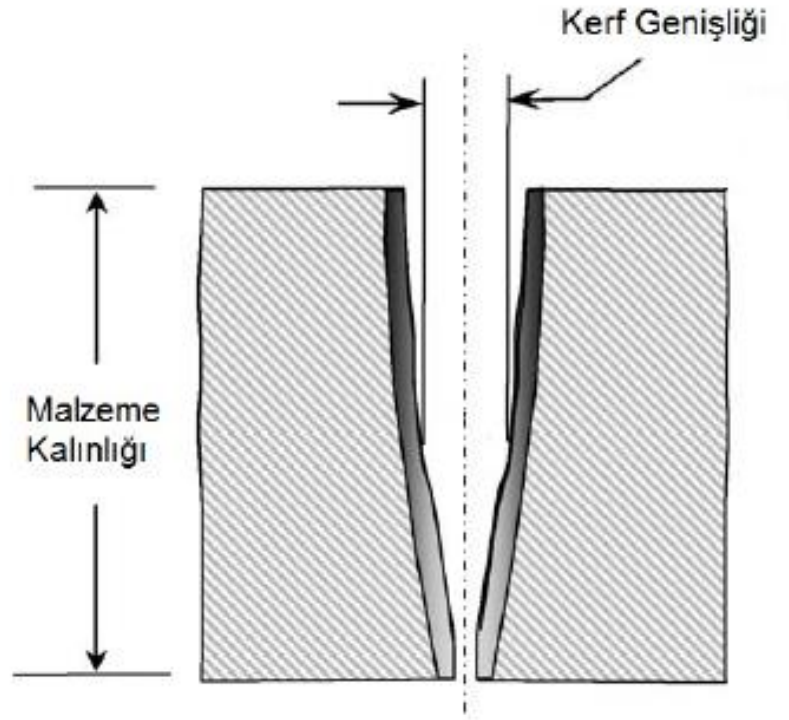
Şekil 4.1. Lazer kesme işleminde karakteristik özellikler

Bu işlem parametreleri, lazer kesim kalitesinin anlaşılmasının yanı sıra uygulamanın da doğru bir şekilde yapıp yapılmadığını belirlemekte yardımcı olan faktörlerdir. Saydığımız bu parametrelerin ve lazerle kesme işleminin doğru bir şekilde uygulamasını sağlayan diğer

faktörler ise; kesme işlemi esnasında kullanılan yardımcı gazlar, kesme başlığının doğru seçimi, yanal kesme hız ayarlarının doğru bir şekilde uygulanmasıdır. Sayılan parametrelerin seçimi; kesme işlemi yapılacak materyalin cinsi, malzemenin kimyasal yapı özellikleri, malzeme lazerle kesim yapılacak kesitin kalınlığı ve en önemlisi, kesme işleminin gerçekleştirileceği makinanın kapasitesi dikkate alınarak yapılmalıdır. [56]

4.1.1. Kerf Genişliği

Kerf genişliği, lazer ile kesme işlemi sırasında oluşan yarığın genişliğidir ve bu genişlik genellikle malzemenin üst yüzeyinde alt yüzeyinden daha geniştir (Şekil 4.2). Kerf genişliği, kesme işlemi sırasında iş parçasından çıkarılan malzemeyi temsil eder. İş parçasından çıkarılan malzeme aslında artık malzemedir. Bu yüzden kesim işlemlerinde her zaman dar kerf genişliği istenmektedir. Lazer gücü, kesme hızı ve koruyucu gaz basıncı parametrelerinin kerf genişliği üzerinde etkisi bulunmaktadır (Wandera vd., 2006) [42].

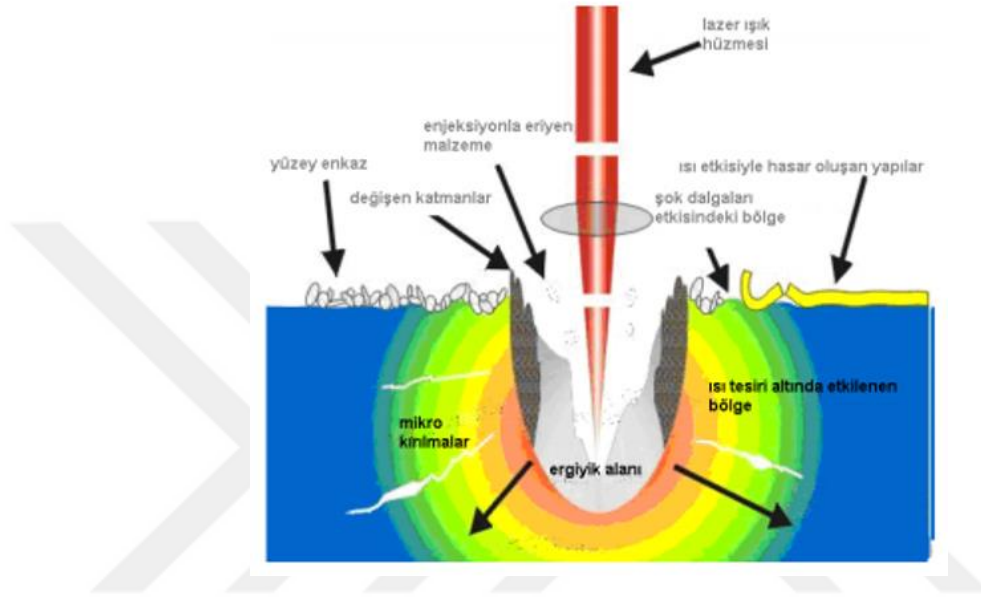


Şekil 4.2. Kerf genişliği şematik gösterimi [56].

4.1.2. Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB)

Isı tesiri altında kalan bölge, metalurjik yapının ısı tarafından etkilendiği fakat ergimenin olmadığı metal bölgedir. Isı tesiri altında kalan bölgedeki mikroyapı değişiklikleri, lazer

kesme işleminde kesme kalitesinin belirlenmesinde göz önünde bulundurulması gereken önemli karakteristik özelliklerden biridir. Isı tesiri altında kalan bölgenin genişliği, kesilen malzemede birim uzunluk başına gelen enerji ve kesilen malzemenin kalınlığına bağlı olarak değişir. Lazer kesme işlemi esnasında ısıdan etkilenen bölgenin genişliği işlem parametrelerinden doğrudan etkilenmektedir(Wandera vd., 2006) [42].

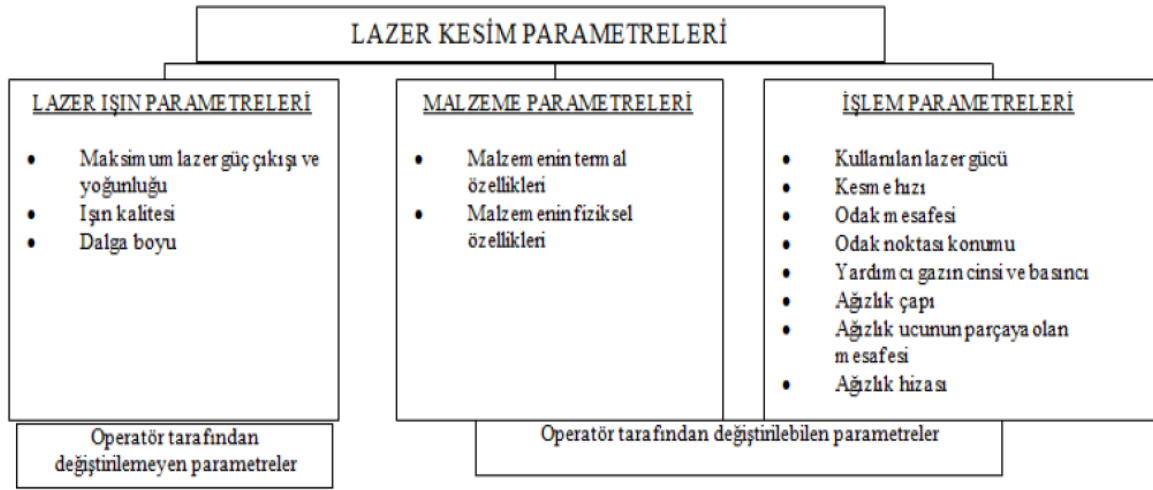


Şekil 4.3. Lazer kesim işlemi sırasında ısı tesiri altındaki bölge[56].

4.2. Lazer İle Kesme İşlemine Etki Eden Parametreler

Lazer kesme işleminin kalitesi, genel olarak malzeme, lazer sistemi ve operasyon parametreleri tarafından belirlenir[35]. Lazer sistemi parametreleri, ışın dalga boyu, maksimum lazer güç çıkışı, lazer ışın kalitesi, kesilen malzemenin özellikleri ve kalınlığını içermektedir. Operasyon parametreleri ise lazer gücü, kesme hızı, merceğin odaklama mesafesi, odak noktasının iş parçası üst yüzeyini takibi, yardımcı gazın basıncı ve türü, ağızlık çapı ve ağızlığın iş parçası üst yüzeyine olan mesafe ayarını kapsamaktadır. Malzeme cinsi ve kalınlığına bağlı olarak bu parametreler değiştirilir. Bununla birlikte lazer sistemine ait bazı karakteristik parametreler operatör tarafından değiştirilemezler[36].

Tablo 4.1. Lazer kesim parametreleri [36].



4.2.1. Lazer Işın Parametreleri

Işın parametreleri, lazer ışınının özelliklerini karakterize eder ve lazer güç çıkışını, ışın kalitesini, ışın dalga boyu ve polarizasyonunu ihtiva eder. Lazer ışını, ışının dalga boyunun, polarizasyon durumunun, yüzeyin optik özelliklerinin ve ışığın geliş açışına bağlı olarak belirli oranda iş parçası yüzeyine yansıtılır ve emilir[37].

4.2.1.1. Lazer Çıkış Gücü ve Yoğunluğu

Lazer gücü, birim zamanda (saniyede) lazer ışığı formunda yayılan toplam enerjidir. Lazer ışın yoğunluğu ise, gücün lazerin yoğunlaştırıldığı alana bölünmesiyle elde edilen bir parametredir. Yüksek ışın yoğunluğu kesme uygulamaları için istenilen bir özelliktir. Çünkü bu özellik kerf aralığının çok kısa zamanda hızlı bir şekilde ısınmasını sağlar ve böylece yüksek kesme hızları ve mükemmel kesme kalitesi elde edilmiş olur. Çoğu metalin yansıtma özelliği, düşük ışık yoğunluğunda yüksektir ve yüksek ışık yoğunluğunda düşüktür. Malzeme kalınlığı arttıkça yoğunluğunda artması gerekir. İşlem geliştirme sırasında optimum güç değerleri belirlenir. Çünkü aşırı güç, geniş bir kerf aralığı ve artık malzemenin artışı ile sonuçlanırken, yetersiz güç ile ise kesme işlemi başlatılamaz[34,38].

4.2.1.2. Dalga Boyu

Metal malzemelerin ışığı yansıtabilme özelliği lazerlerin dalga boyunun bir fonksiyonudur. Metaller uzun kızılötesi dalga boylarını (CO_2 lazer dalga boyu), kısa

kızılötesi dalga boylarından (Nd:YAG lazer dalga boyu) daha iyi yansır[38, 40]. Bir Nd:YAG ışını daha iyi hassasiyet, daha dar bir kerf genişliği ve daha kaliteli bir kesme yüzeyi sağlamak amacıyla, CO_2 lazer ışınına kıyasla, daha küçük çaplara odaklanabilir[34].

Kızıl ötesi dalga boyu 10.6 μm olan CO_2 lazer ışınının soğurulma oranı malzemelerin elektrik iletkenlikleri tarafından belirlenir. Oda sıcaklığında altın, gümüş, bakır, alüminyum gibi iletkenliği yüksek metaller çok az miktarda CO_2 lazer ışını soğururlar ve bunun büyük çoğunluğunu yansıtırlar. Çelik gibi orta düzey iletken malzemeler %10 civarında bir soğurma gösterirler. Plastik ve ahşap esaslı yalıtkan malzemeler mükemmel soğurma kabiliyeti gösterirler. Diğer yandan Nd:YAG türü lazerlerin metaller tarafından soğurulma kabiliyeti daha yüksektir. Fakat yalıtkanlar yalnızca ihmal edilebilir bir soğurma gösterir. Bunun sebebi yalıtkanların ışını soğurabilmesi amacıyla iyonize olması için çok büyük enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Belirli bir uygulama için uygun lazer türü darbe süresi, gücü, odaklanabilirliği ve dalga boyu değerlerine göre belirlenir[38,40].

Oda sıcaklığında CO_2 lazer ışığını iyi derecede yansıtan metaller, ısıtıldıklarında iyi bir soğurucu haline gelirler. Kesme işlemi başladıktan sonra, kesim sanki siyah bir gövdeymiş gibi hareket eder ve lazer ışığı ergimiş ince tabaka tarafından güçlü bir şekilde soğurulur. Erimiş yüzeyle temas eden lazer ışınının yansıma kabiliyeti, lazer ışığının yüzeyle yaptığı açıya, lazer ışığının polarizasyon tabakasına ve ergimiş malzemenin optik özelliklerine bağlıdır. Bakır ve alüminyum gibi demir dışı metallerde soğurma özelliğini arttıran ısıtma işlemini gerçekleştirmek zordur. Bunun nedeni bu metallerde kesme işleminin etkinliğini azaltan yüksek yansıtma kabiliyetinin yüksek termal iletkenlik özelliğiyle birlikte bulunmasıdır[41,44,45].

4.2.1.3. Kesme Hızı

Lazer kesme işlemlerindeki enerji dengesi iki parçaya ayrılmaktadır. Bir kesme meydana getirmek için enerji kullanılır ve kullanılan enerji kesme bölgesinden uzaklaşır. Bu da göstermektedir ki kesmede kullanılan enerji, kesmeyi gerçekleştirmek için gereken zamandan bağımsızdır. Fakat kesme bölgesinde olan enerji kaybı harcanan zamanla orantılıdır. Kesme bölgesinden olan enerji kaybı kesme hızının artmasıyla azalır. Kalın malzeme kesiminde kesme hızındaki azalma, kayıp enerjide artmaya ve işlemin etkinliğinin düşmesine yol açar. Çoğu metalde meydana gelen termal iletkenliğe bağlı ısı kayıpları, malzeme kalınlıklarındaki artma ve kesme hızlarındaki azalma ile hızlıca artar[43].

Kesme hızı, lazer gücü ve gaz akış oranı ile dengelenmelidir. Kesme hızının artmasıyla kesme kenarında oluşan şeritler daha da belirginleşir, kesme kenarı altında cüruf biriktirme artar ve nüfuziyet azalır. Yumuşak çelik keserken oksijen kullanıldığında, düşük kesme hızlarında, kesme kenarlarında aşırı yanmalar meydana gelir. Bu da kenar kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) genişletir. Genellikle malzemeler için kesme hızları malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Hız, keskin köşe kesimlerdeki yanmalardan kaçınmak için azaltılmalıdır[34].

4.2.1.4. İşlem Gazı ve Gaz Basıncı

İşlem gazının lazer kesimde 5 beş temel ilkesi vardır. Nitrojen gazı cürufu kesme bölgesinin altında yeniden katılaşmadan uzaklaştırır. Oksijen gibi bir aktif gaz malzeme ile ekzotermik bir reaksiyonda yer alır. Gaz ayrıca yüksek ışın gücü ile, kalın malzemelerin kesiminde plazmanın oluşumunu destekleyen bir rol oynar ve odaklama merceği gaz akışı tarafından kirlenmekten korunur. Kesme kenarı gaz akışı tarafından soğutulur ve böylece ısı tesiri altındaki bölgenin genişlemesi kısıtlanır[34].

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yaygın olarak kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajları ile birlikte oksijen (aktif gaz) ve nitrojendir. Tamamen asal olmamasına rağmen, nitrojen ucuz olması sebebiyle yaygın bir şekilde işlem gazı olarak kullanılır. Soy gazlardan argon ve helyum titanyum kesiminde kullanılır. Çünkü bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önler[34,44,47]. Nitrojen gazı, kerf aralıklarından cürufu uzaklaştırmak için daha yüksek basınç gerektirdikleri için paslanmaz çelik, alaşımlı çelik, alüminyum ve nikel alaşımlarının kesiminde kullanılırlar. Yüksek gaz basıncı ergimiş malzemeyi kerf aralığından uzaklaştırmak için ekstra mekanik bir kuvvet sağlar. Yüksek basınçlı nitrojenli kesim paslanmaz çelik kesmede kullanılır. Bunun nedeni parlak ve oksitsiz bir kesme kenarı ortaya koymasıdır. Fakat oksijen kullanılarak yapılan kesimden daha düşük kesme hızları ile işleme gerçekleştirilir. Soy gaz ile yapılan kesimlerde asıl problem, yeniden katılaşan ergimiş metalin kerf aralığında çapaklar oluşturmasıdır. Çapaksız ve pürüzsüz kesim bazı işleme parametrelerinin optimize edilmesiyle başarılı; ağızlık çapı, odak pozisyonu ve gaz basıncı. Nitrojen 10-20 bar civarında bir basınç ortaya koyar ve basınç gereksinimi malzeme kalınlıklarının artmasıyla artar. Nitrojen gazının saflığı %99.8 civarlarında olmalıdır[34,38,43,44,47].

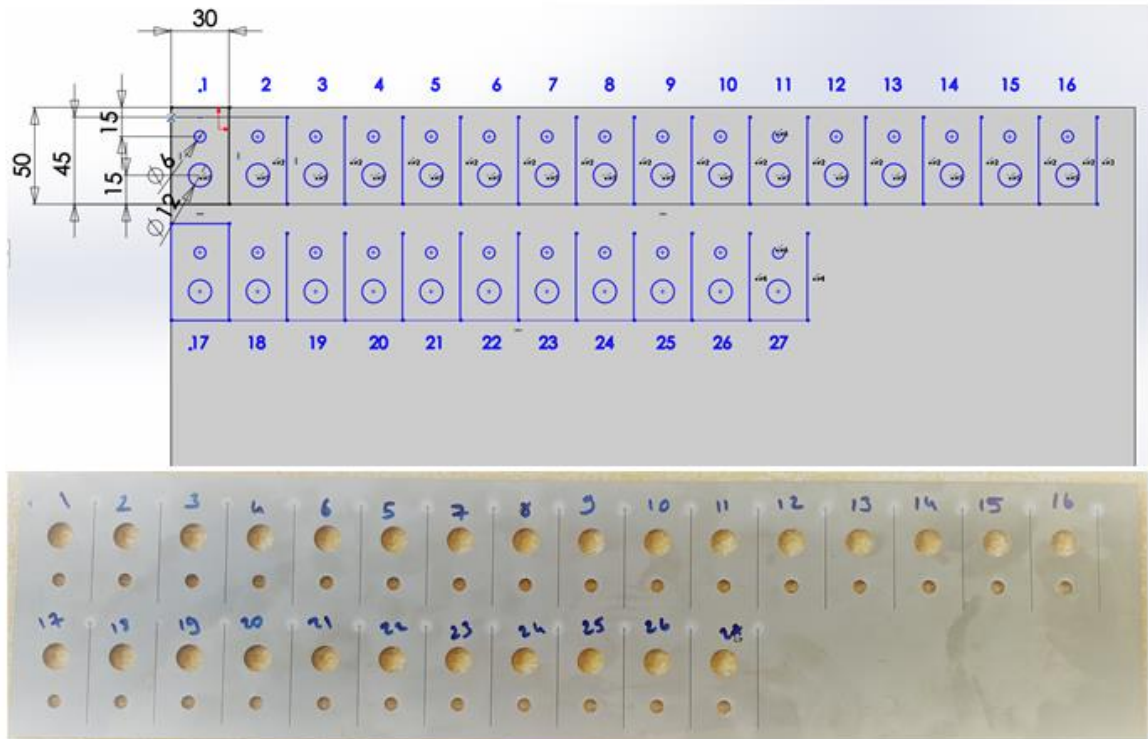
5. MATERYAL VE METOD

5.1. Deney Malzemesi ve Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında kimyasal bileşim tablo 5.1 de verilmiş olan endüstride Gr5 olarak isimlendirilen Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. 2 mm kalınlığındaki Ti6Al4V plaka fiber lazer kesim tezgâhında değişken olarak seçilen (lazer gücü, kesme hızı, gaz basıncı) parametreler, 3 farklı seviyede değiştirilerek toplam 27 adet kesim yapılmıştır. Bu kesime ait görüntü Şekil 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1: Ti6Al4V titanyum alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Ti	Al	V	Fe	C	N	O
89,7	6,01	3,89	0,2	0,01	0,018	0,15



Şekil 5.1. Lazer ile işlenen numunenin tasarımı ve kesim sonrası görüntüsü

5.2. Lazer Işınıyla Kesme Deneyleri

Çalışmada, fiber lazer kesim tezgâhı ile Ti-6Al-4V kesim yapılmıştır. Farklı güç, basınç, hız seviyeleriyle ilgili ön deneyler yapıldıktan sonra, 2mm lik malzeme kalınlığı sabit tutularak farklı güç, basınç, hız değerleri ile toplamda 27 adet kesim parçası oluşturulmuştur. Güç 3000 – 3500 – 4000 watt, basınç 12 – 15 – 18 bar, hız 13600 – 16000 – 18400 mm/dak değerleriyle kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.2’ de, deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri, tablo 5.3’ de ise deney sıralaması verilmiştir.

Tablo 5.2: Lazer kesme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri ve seviyeleri

Kesme Parametreleri	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Lazer Gücü (W)	3000	3500	4000
Puls Frekansı (Hz)	200		
Kesme Hızı (mm/dak)	13600	16000	18400
Yardımcı Gaz	Ar		
Gaz Basıncı (Bar)	12	15	18
Nozul Çapı (mm)	2		
Lens Çapı (mm)	150		
Odak Pozisyonu (mm)	-1,2 (Yüzey altı)		

Tablo 5.3: Lazer kesim deney sıralaması

Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)
1	3000	13600	12
2	3000	13600	15
3	3000	13600	18
4	3000	16000	12
5	3000	16000	15
6	3000	16000	18
7	3000	18400	12
8	3000	18400	15
9	3000	18400	18
10	3500	13600	12
11	3500	13600	15
12	3500	13600	18
13	3500	16000	12
14	3500	16000	15
15	3500	16000	18
16	3500	18400	12
17	3500	18400	15
18	3500	18400	18
19	4000	13600	12
20	4000	13600	15
21	4000	13600	18
22	4000	16000	12
23	4000	16000	15
24	4000	16000	18
25	4000	18400	12
26	4000	18400	15
27	4000	18400	18

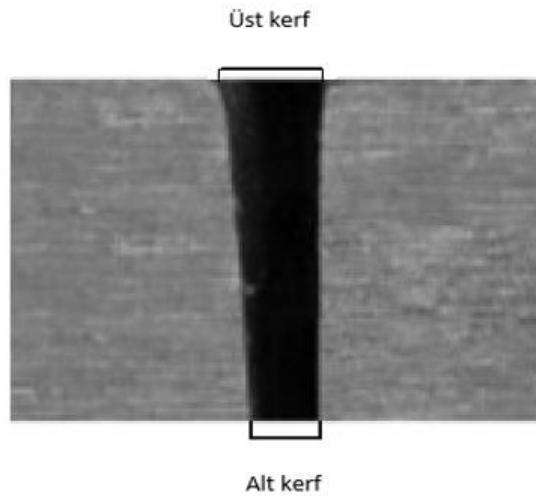
Fiber lazer ile kesme deneyleri Bursa Ermaksan A.Ş. firmasında Fibermak G Force Fiber Lazer kesim tezgahı ile yapılmıştır. Şekil 5.2' de bu tezgahın fotoğrafı görülmektedir. Deneylerde, lens çapı (150 mm), nozul çapı (2 mm), yardımcı gaz tipi (Ar), puls frekansı (200 Hz) ve odak pozisyonu (-1,2 (Yüzey altı)) sabit tutulmuştur.



Şekil 5.2. Deneyde kullanılan fiber lazer kesim tezgahı

5.3. Kerf Geometrisi Ölçümleri

Her bir parametre ile yapılan kesme deneyleri sonunda, Şekil 5.3’ de şematik olarak gösterilen kesme kalitesini belirlemede etkili olan kerf genişliği ve kerf eğim açısı değerlerinin belirlenmesi amacıyla her bir numunedeki kesim için alt ve üst kerf genişlikleri kerf boyunca beş ayrı noktadan 0.002 hassasiyete sahip (Model 98-0001, SCHERR TUMICO, U.S.A) ölçüm mikroskobuyla ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak numunelerin kerf genişlik değeri belirlenmiştir.



Şekil 5.3. Lazer kesim sonucu elde edilen tipik kerf geometrisi

Mikroskopta ölçülen alt ve üst kerf genişlikleri değerine bağlı olarak aşağıdaki formül yardımıyla kerf eğim açısı ($K_{e.a}$) hesaplanmıştır.

$$K_{e.a} = \frac{(K_{\bar{u}} - K_a) * 180}{2 * \pi * t} \quad (5.1)$$

Formüldeki $K_{\bar{u}}$, üst kerf genişliği K_a , alt kerf genişliği t ise iş parçasının kalınlığını ifade etmektedir.

5.4. Metalografik İncelemeler

Kesme deneyleri sonucunda, numunelerin yüzey görüntüleri, yüzeylere ait mikro yapıları ve ısıdan etkilenen bölgeleri belirlemek için, işlenen yüzeye dik komşu bir yüzey seçilerek bakalite alındıktan sonra bu yüzeyler sırasıyla, 400, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile zımparalanmış ve daha sonra 3µm ve 1 µm'luk elmas pasta kullanılarak çuhayla parlatılmış ve sonra alkolle yıkanarak kurutulmuştur. Dağlama işleminde, Ti-6Al-4V için keller çözeltisi (%0,5 HF - %1,5HCl - %2,5HNO₃ - %95,5 H₂O) kullanılmıştır. Dağlama işleminden sonra, numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numunelere ait SEM görüntüleri alınırken numunelerin kesilmiş yüzeylerinde oluşan elementer içerikleri ve fazları tespit etmek için EDS (energy dispersive spectrograph) ve XRD (X – ray diffraction) analizleri yapılmıştır. Tüm bu işlemler Elazığ Fırat Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezinde (FÜBTAM) yapılmıştır.

5.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Fiber lazer ile kesme sonrasında numunelerin mikrosertlik ölçümleri şekil 5.4' de görülen Tronic DHV-1000 Micro Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Numunede uygulanan yük 2,98 gr olup bekleme süresi 15 saniye olarak seçilmiştir. Numune üzerinde, yeniden katılaştıran tabaka, ısıdan etkilenen bölge ve ana malzeme olmak üzere üç ayrı bölgeden altışar adet olmak üzere toplam 18 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin mikrosertlik değerleri belirlenmiştir.

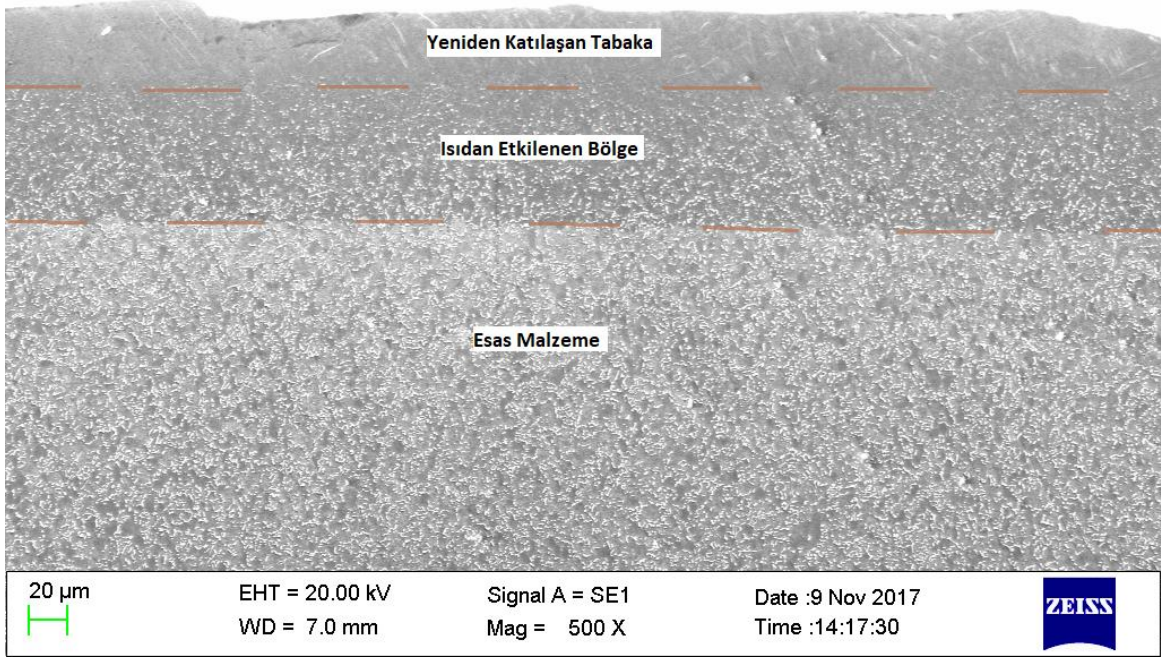


Şekil 5.4. Tronic dhv-1000 micro vickers sertlik ölçüm cihazı

6. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

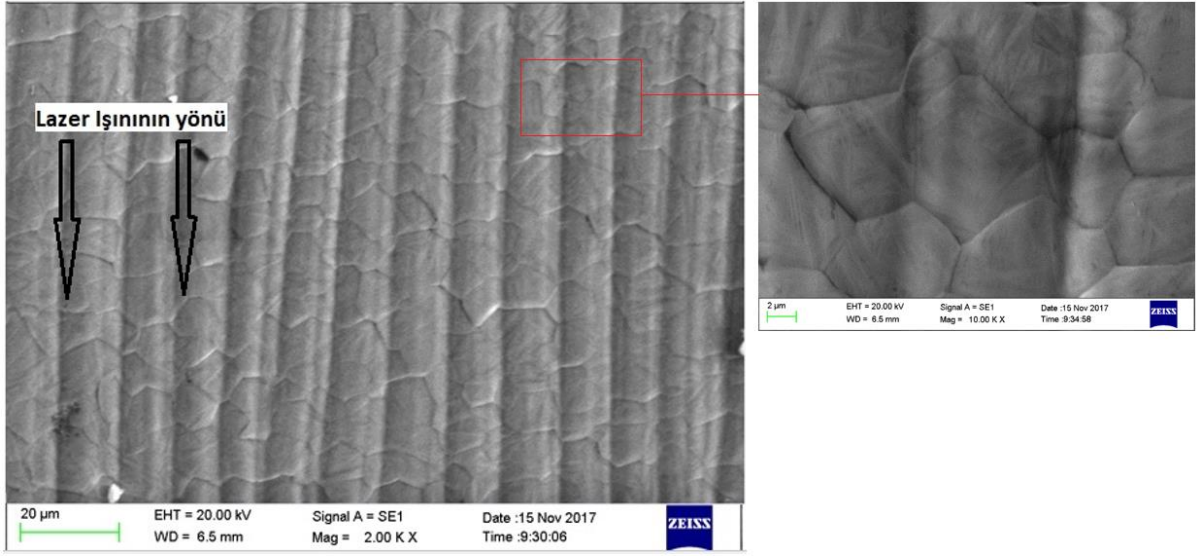
6.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Lazer ışını ile kesme esnasında oluşan temel metalürjik etkiler, yeniden katılaşan bölge ve ITAB'ın şekil ve boyutlarındaki değişimlerdir. Şekil 6.1'de işlenmiş bir yüzeyden alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Fotoğraf incelendiğinde, üç farklı bölge görülmektedir. En üstte bulunan yeniden katılaşan tabakadır. Bu tabaka, lazer ışını ile kesme esnasında eriyik metalin yardımcı gaz basıncı ile kesme kanalından uzaklaştırılmadan yüzeyde hızlı bir şekilde soğuyup yeniden katılaşması sonucunda oluşmaktadır. Isıdan etkilenen bölge ise, kesme esnasında ergimenin olmadığı fakat meydana gelen ısının tesiriyle esas metalin mikroyapı değişikliğine uğradığı bölgedir. En altta ise esas malzeme bulunmaktadır.



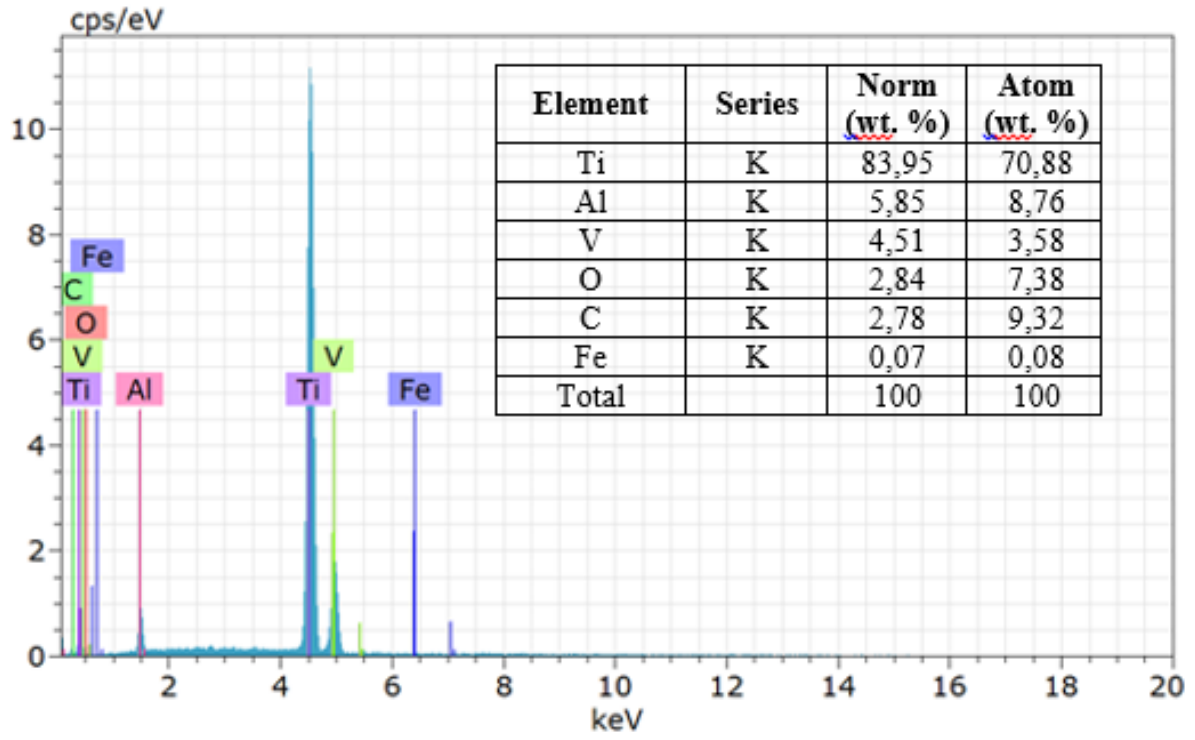
Şekil 6.1. Lazer ışını ile kesme sonrası malzemede meydana gelen yüzeysel bölgeler

Lazer ışınıyla kesilen malzemenin kesim yüzeyi Şekil 6.2' de olduğu gibi lazer ışınının etkisiyle sıvı metal akışının olduğu çizgileri belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu çizgilerinin oluşmasının nedeni, lazer ışını sabit frekansta malzemeye doğru hareket ederken mikrodalgalar oluşturur ve daha sonra ısı iletiminden dolayı eriyik malzeme oluşur ve gaz akışının eriyik malzemeyi yüzeyden uzaklaştırması ve aynı zamanda hızlı soğumanın da etkisiyle yeniden katılaşan tabaka bu şekilde oluşur. (Lv. Shanjin) [53]

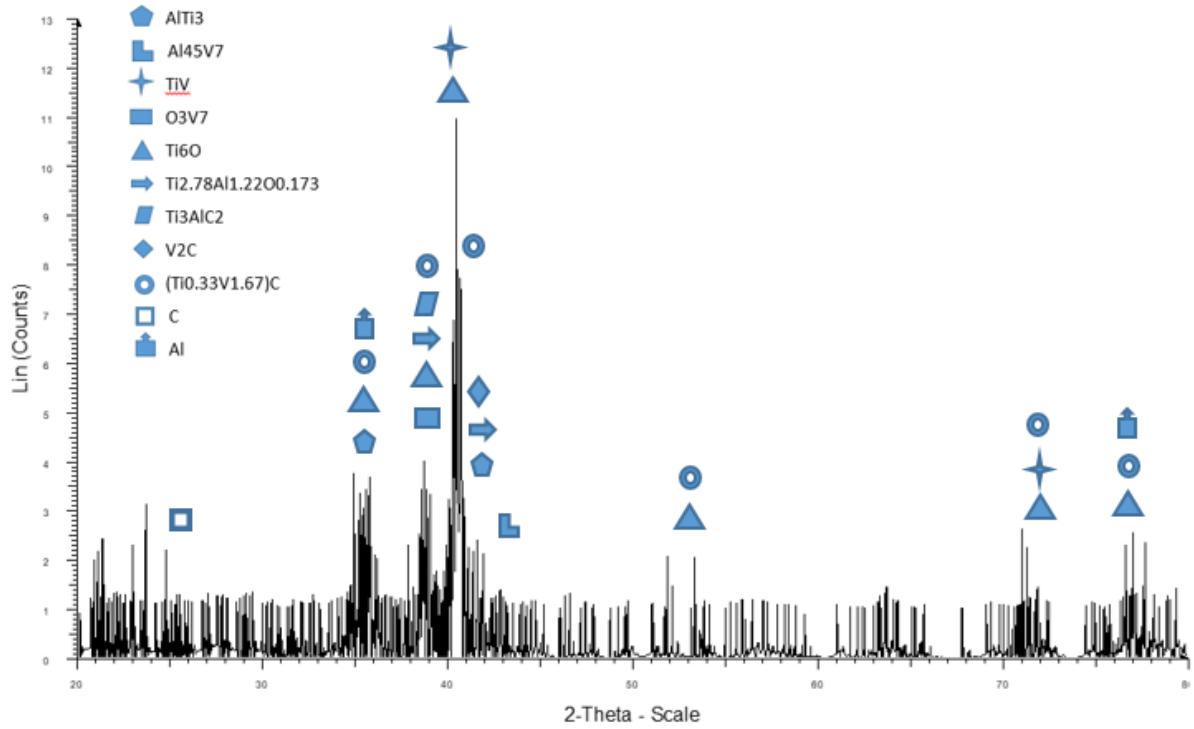


Şekil 6.2. Yeniden katılaşan tabakanın üstten (kesilen yüzey), görüntüsü

Numunenin yeniden katılaşan tabaka bölgesinden alınan EDS sonuçları şekil 6.3’ de verilmiştir. Analiz sonucu değerlendirildiğinde oksitlenmeden kaynaklanan O miktarı % 2,84 olarak ortaya çıkmıştır. C miktarı ise % 0,01’ den % 2,78’ e yükselmiştir. Bu durum şekil 6.4’ de verilen XRD sonuçlarıyla birlikte değerlendirildiğinde lazer ışınıyla kesme işlemi sonrasında bu bölgede oluşan aşırı ısınma ve soğumanın etkisi ile yapıda bulunan ikincil fazların ve karbürlerin kısmen ana matrise geri çözündüğü düşünülmektedir. Bununla birlikte çoğu numunenin içerisinde ise Oksijen elementi görülmüştür. Bu fazın yapı içerisinde bulunmasının sebebi titanyum metalinin yüksek sıcaklıklardayken oksijene karşı afinitesinin yüksek olmasıdır. Sıcaklık değerinin fazla olması oksit fazlarının görülmesinin en büyük sebebidir.



Şekil 6.3. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan EDS analizi

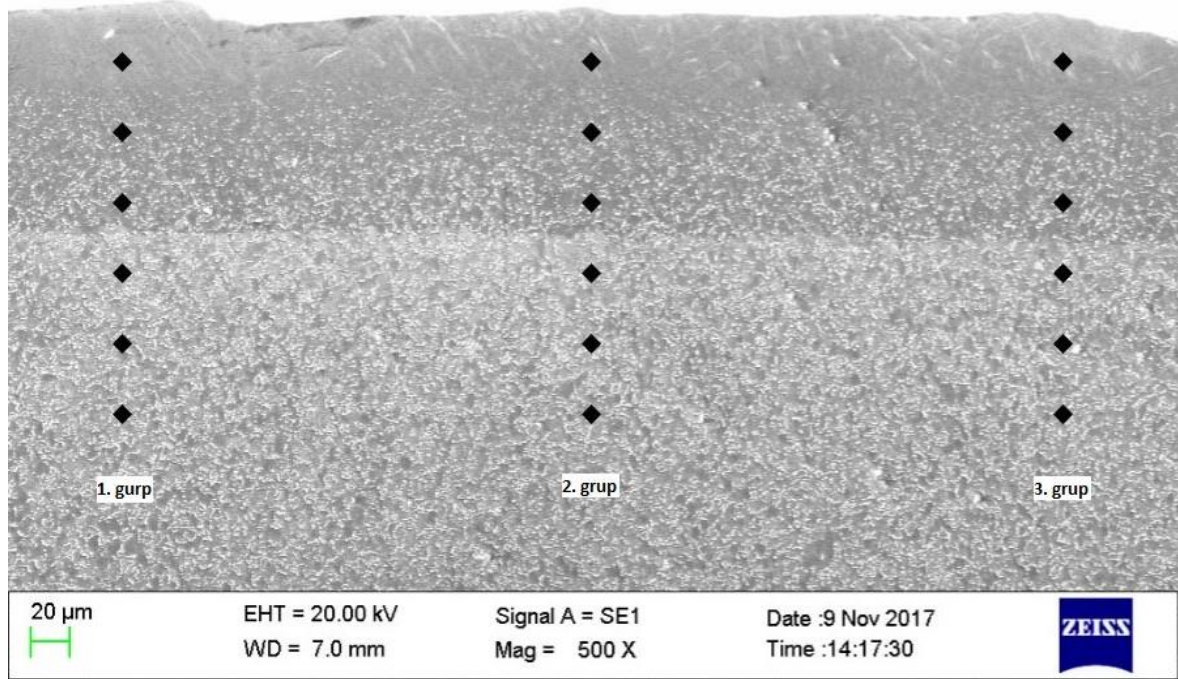


Şekil 6.4. Lazer ışını ile kesilmiş yüzeyden alınan XRD analizi

6.2 Lazer Işını İle Kesme Deney Sonuçları

6.2.1. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Lazer ışını ile kesme neticesinde, yüksek ısının etkisiyle kesme bölgesinde oluşan en önemli değişikliklerden birisi de malzemedeki mikrosertlik değişimidir. Kesme işleminden sonra üç farklı bölgenin mikrosertlik değerlerinde farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.5’ de görüldüğü gibi Numune üzerinde oluşan bu üç ayrı bölgeden belli aralıklarla altışarlı grup olmak üzere toplam 18 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınarak bu üç bölgenin mikrosertlik değerleri tablo 6.1’ deki gibi ölçülmüştür.

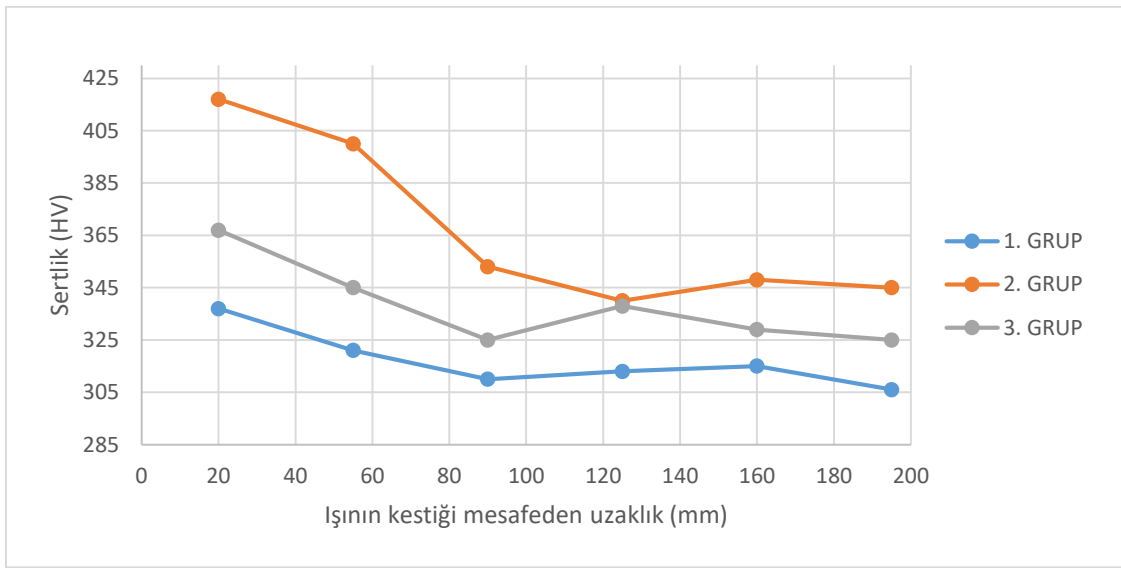


Şekil 6.5. Sertlik ölçme deneyinin SEM görüntüsü

Tablo 6.1. Mikrosertlik ölçüm sonuçları

1. GRUP		2. GRUP		3. GRUP	
Işının kestiği bölgeden uzaklık (µm)	Sertlik (HV)	Işının kestiği bölgeden uzaklık (µm)	Sertlik (HV)	Işının kestiği bölgeden uzaklık (µm)	Sertlik (HV)
20	337	20	417	20	367
55	321	55	400	55	345
90	310	90	353	90	325
125	313	125	340	125	338
160	315	160	348	160	329
195	306	195	345	195	325

Tablo 6.1 ile Şekil 6.6’ de görüldüğü gibi, ısıdan etkilenen bölgenin sertliği ana malzemeye benzerlik gösterirken, YKTK’ nın sertliği ana malzemeye göre daha yüksektir. Malzemedeki YKTK’ nın sertlik artışı da malzemenin kesme bölgesinde aşırı ergime ve hızlı soğuma neticesinde mikroyapıda aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artışında kısmen rol almaktadır. Bununla birlikte yeniden katılaştıran tabakada sertliğin artması, XRD analizinde de görüldüğü gibi oksit tabakasının oluşması ve karbon gibi çözülmüş atmosferik elementlerin artması ile düzensiz bir mikroyapı ortaya çıkmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.6. Mikrosertlik ölçüm grafiği

6.2.2 Yeniden Katılaştıran Tabaka Kalınlığı (YKTK) Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.2’ de 27 adet Ti6Al4V numunesine ait ortalama YKTK değerleri toplu şekilde verilmiştir.

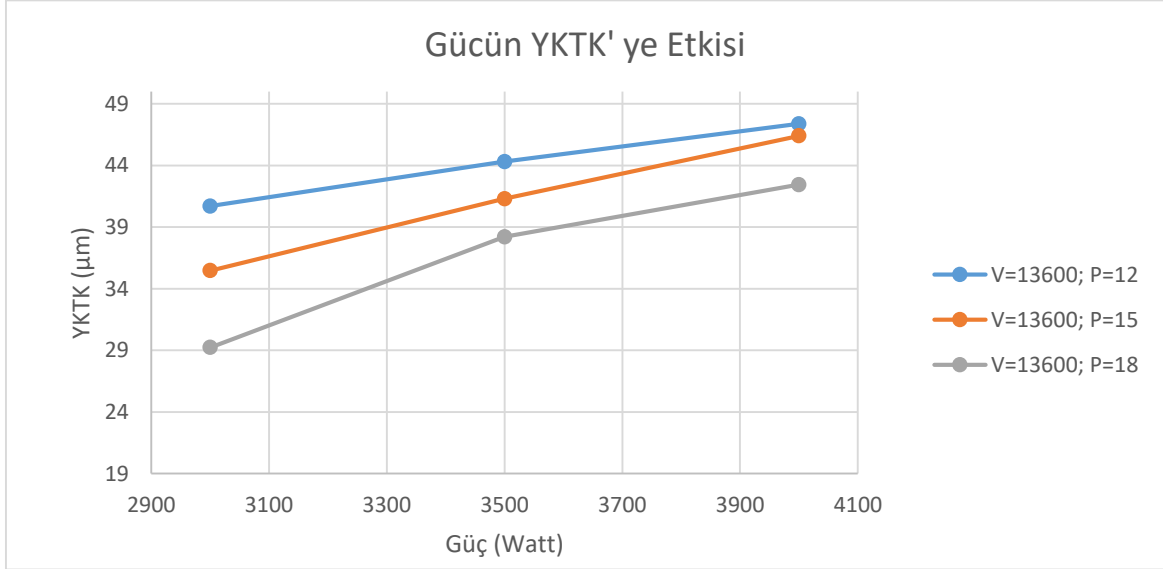
Tablo 6.2: Lazer ışını ile kesme sonrasında ölçülen ortalama YTK değerleri

Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)	YTK (µm)
1	3000	13600	12	40,7
2	3000	13600	15	35,47
3	3000	13600	18	29,24
4	3000	16000	12	34,62
5	3000	16000	15	30,5
6	3000	16000	18	23,46
7	3000	18400	12	27,6
8	3000	18400	15	21,68
9	3000	18400	18	20,15
10	3500	13600	12	44,32
11	3500	13600	15	41,3
12	3500	13600	18	38,21
13	3500	16000	12	42,12
14	3500	16000	15	37,84
15	3500	16000	18	33,23
16	3500	18400	12	36,4
17	3500	18400	15	31,26
18	3500	18400	18	25,36
19	4000	13600	12	47,38
20	4000	13600	15	46,41
21	4000	13600	18	42,45
22	4000	16000	12	45,74
23	4000	16000	15	43,8
24	4000	16000	18	39,56
25	4000	18400	12	43,1
26	4000	18400	15	38,4
27	4000	18400	18	32,18

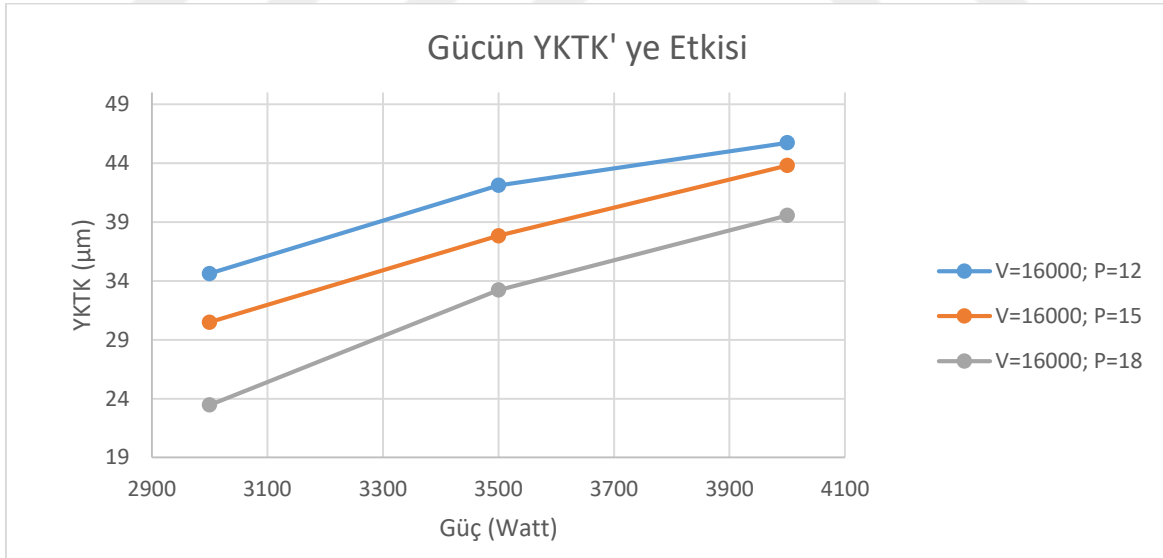
6.2.2.1 YTK' nın Güç İle Değişimi

Lazer gücünün artması ile ısı girdisi arttığından yeniden katılaşan tabaka kalınlığında artış oluşturmaktadır. Aşırı güç sonucu ergiyen malzeme ise yardımcı gaz basıncının etkisiyle YTK'nı oluşturur. Yeniden katılaşan tabaka kalınlığının güce bağlı değişimini gösteren numunelere ait grafik şekil 6.7 'de, SEM görüntüsü ise şekil 6.8' de sırasıyla verilmiştir. Görüntü ve grafikten de görüldüğü gibi gücün artmasıyla YKT kalınlığı

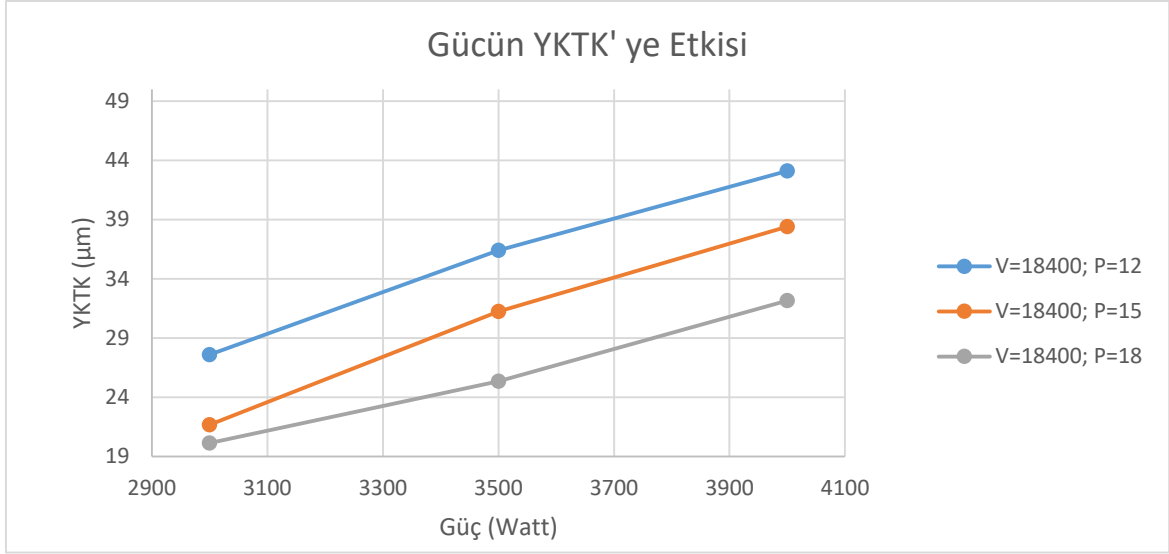
artmaktadır. Gücün 3000 w olduğu durumda YKT kalınlığı 20,15 μm ölçülürken 3500 watt’ da 25,36 μm , 4000 watt gücünde ise 32,18 μm olarak ölçülmüştür.



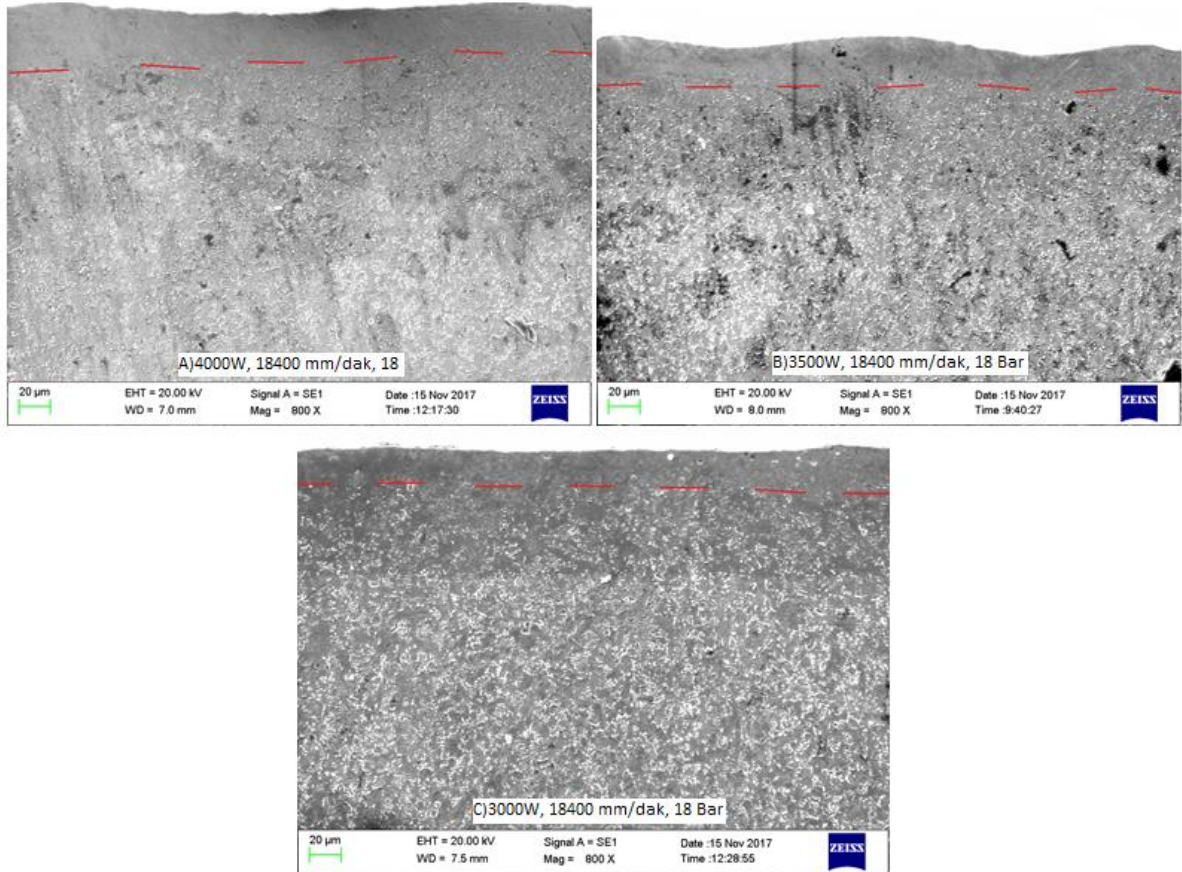
Şekil 6.7.1. V=13600 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi



Şekil 6.7.2. V=16000 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi



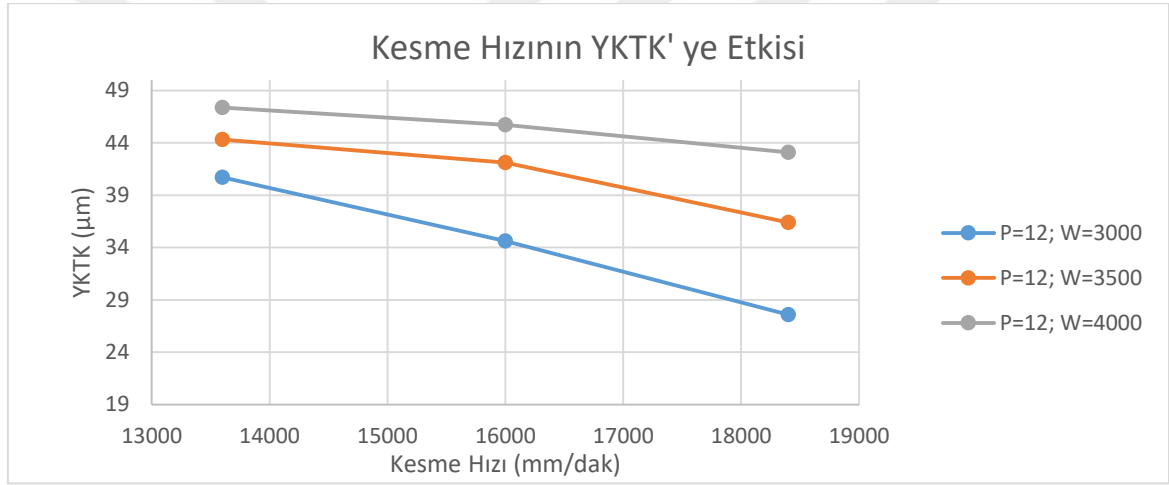
Şekil 6.7.3. V=18400 mm/dak için YKTK' nın güce bağlı değişimi



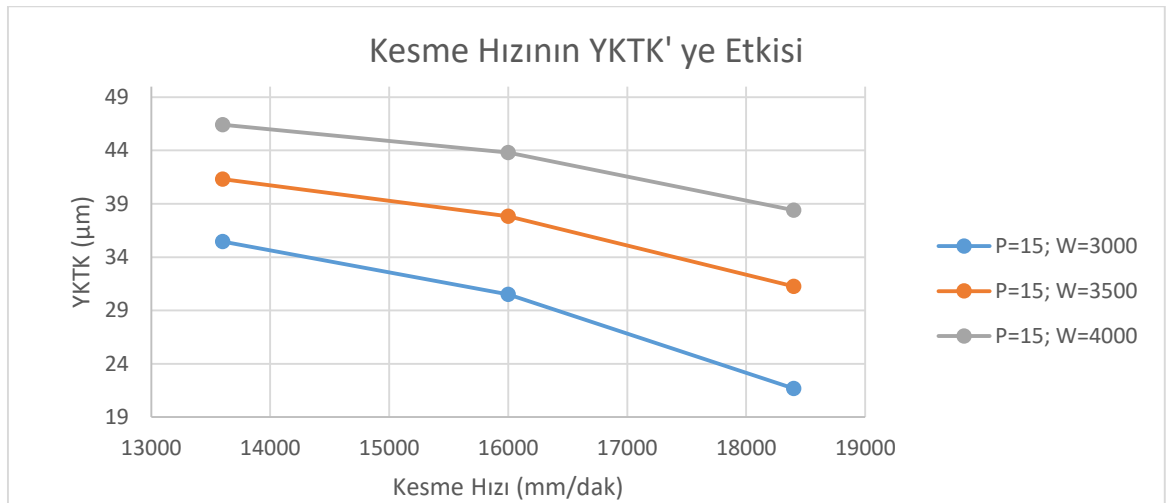
Şekil 6.8. Gücün YKTK' ye etkisi (A) 27 nolu numune, B) 18 nolu numune, C) 27 nolu numune)

6.2.2.2 YKTK' nın Kesme Hızı İle Değişimi

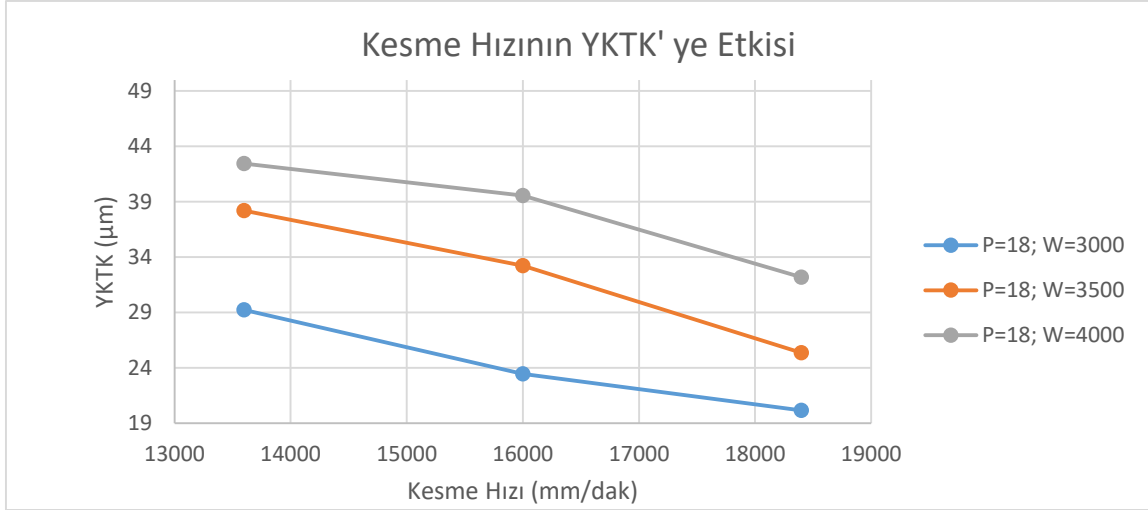
Şekil 6.9' daki grafikte görüldüğü gibi kesme hızının artmasıyla YKT kalınlığında önemli derecede düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi, güç yoğunluğuna bağlı malzemede oluşan ısı, düşük hızda daha etkili olduğundan dolayı daha fazla malzeme eritmektedir. Yüksek hacimdeki ergiyik malzeme ise YKT kalınlığını arttırmaktadır. Yeniden katılaştıran tabaka kalınlığının kesme hızına bağlı değişimini gösteren numunelerin SEM görüntüsü şekil 6.10' da sırasıyla verilmiştir. SEM fotoğraflarından da görüldüğü gibi kesme hızının artmasıyla YKT kalınlığı azalmaktadır. Hızın 13600 mm/dak olduğu durumda YKT kalınlığı 42,45 μm ölçülürken 16000 mm/dak' da 39,56 μm , 18400 mm/dak' hızında ise 32,18 μm olarak ölçülmüştür.



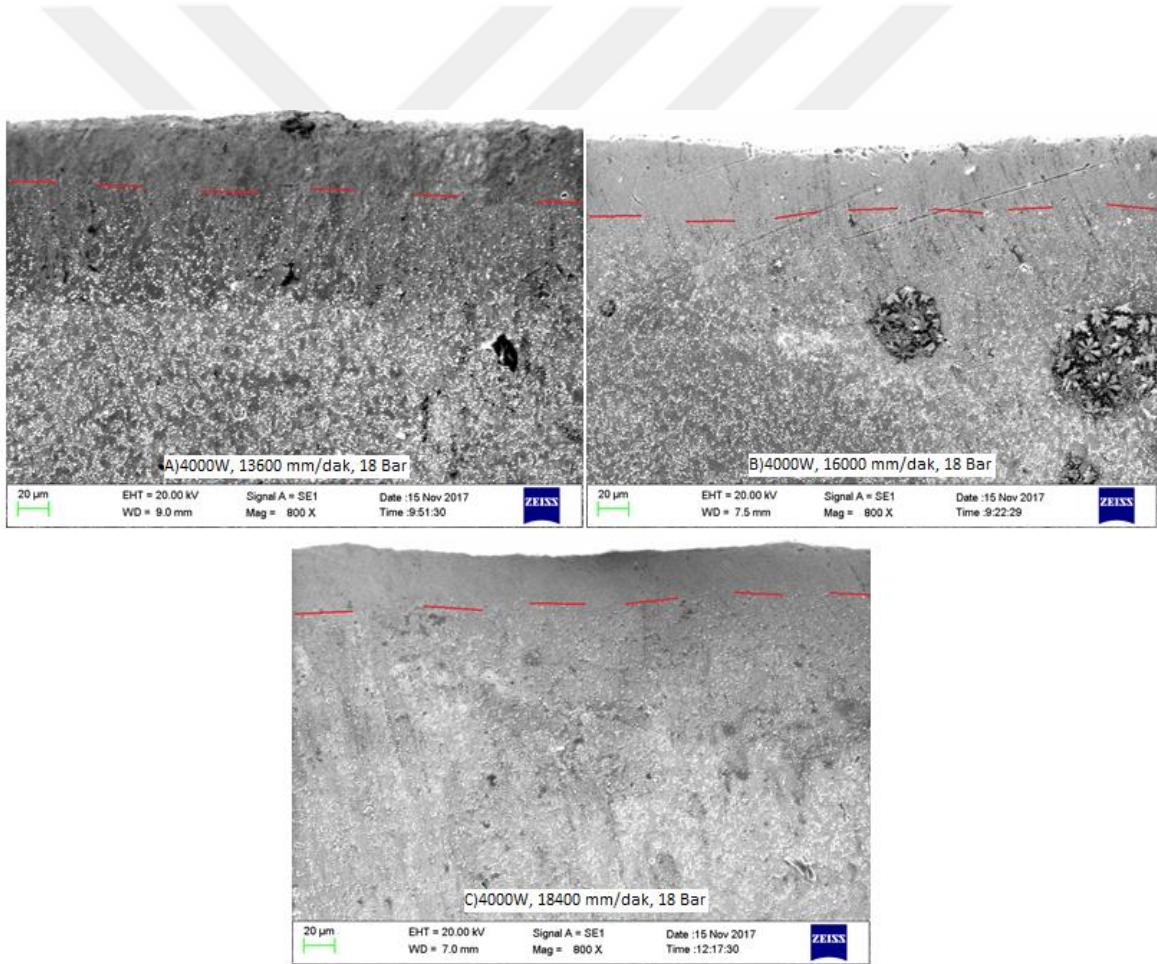
Şekil 6.9.1. P= 12 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi



Şekil 6.9.2. P= 15 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi



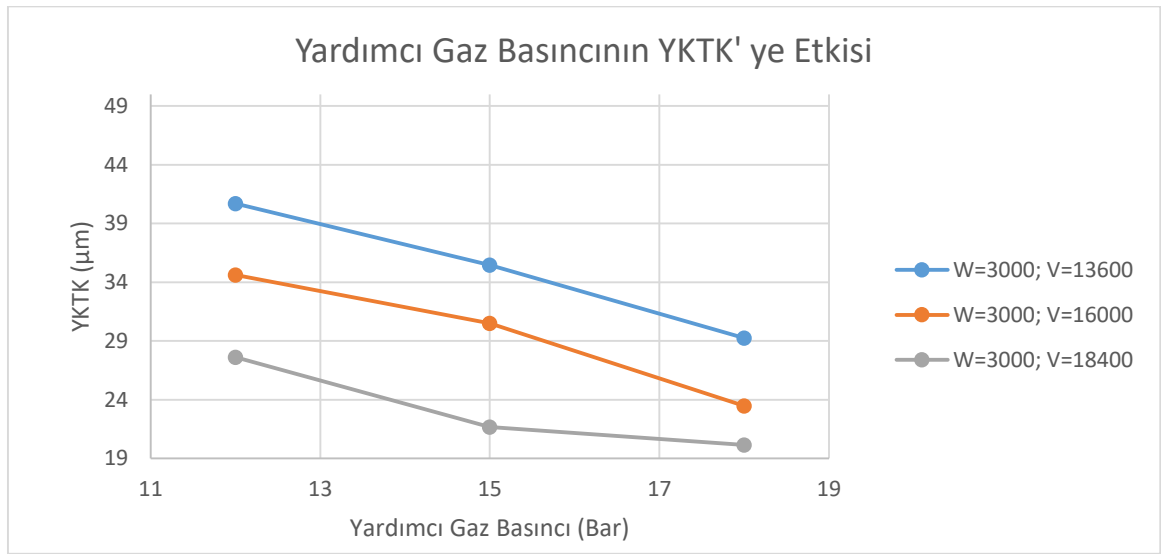
Şekil 6.9.3. P= 18 bar için YKTK' nın kesme hızına bağlı değişimi



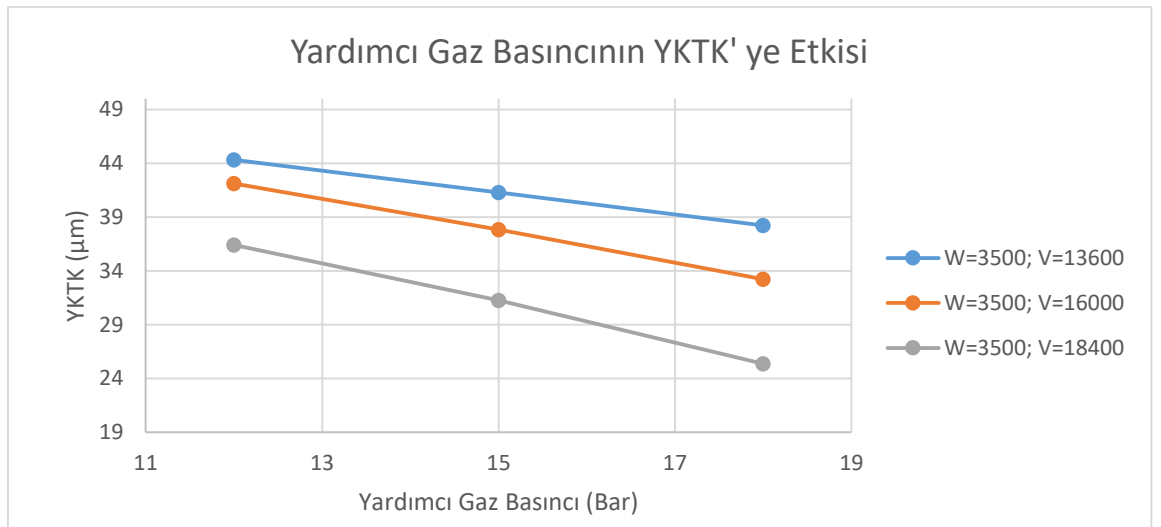
Şekil 6.10. Kesme hızının YKTK' ye etkisi. (A) 21 nolu numune, B) 24 nolu numune, A) 27 nolu numune)

6.2.2.3 YKTK' nın Yardımcı Gaz Basıncı İle Değişimi

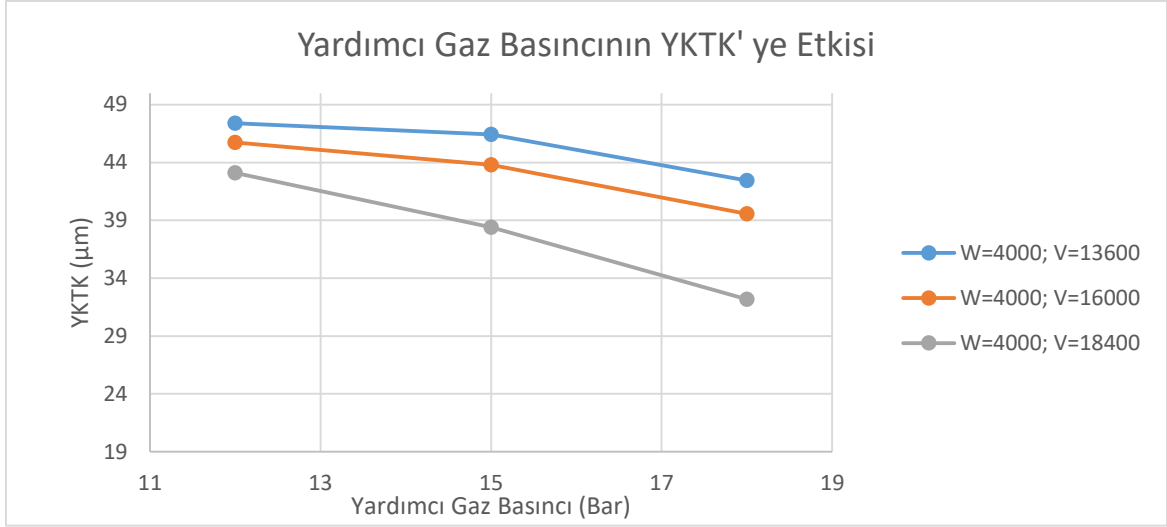
Gaz basıncının YKT kalınlığında güç ve hız kadar etkili değildir. Şekil 6.11' deki grafikten ve Şekil 6.12' daki SEM görüntülerinden de anlaşıldığı gibi yardımcı gaz basıncının artması ile YKT kalınlığı azalmıştır. Bunun nedeni, gaz basıncının artmasıyla lazer ışını ile malzemenin etkileşim bölgesindeki ergimiş metalin yüzeyinde soğutma etkisi oluşturduğundan, YKTK azalmaktadır. Gaz basıncının 12 bar olduğu durumda YKT kalınlığı 40,70 μm ölçülürken 15 bar' da 35,47 μm , 18 bar gaz basıncında ise 29,24 μm olarak ölçülmüştür. Benzer sonuçlar Lv. Shanjin[53]' nin çalışmalarında da elde edilmiştir.



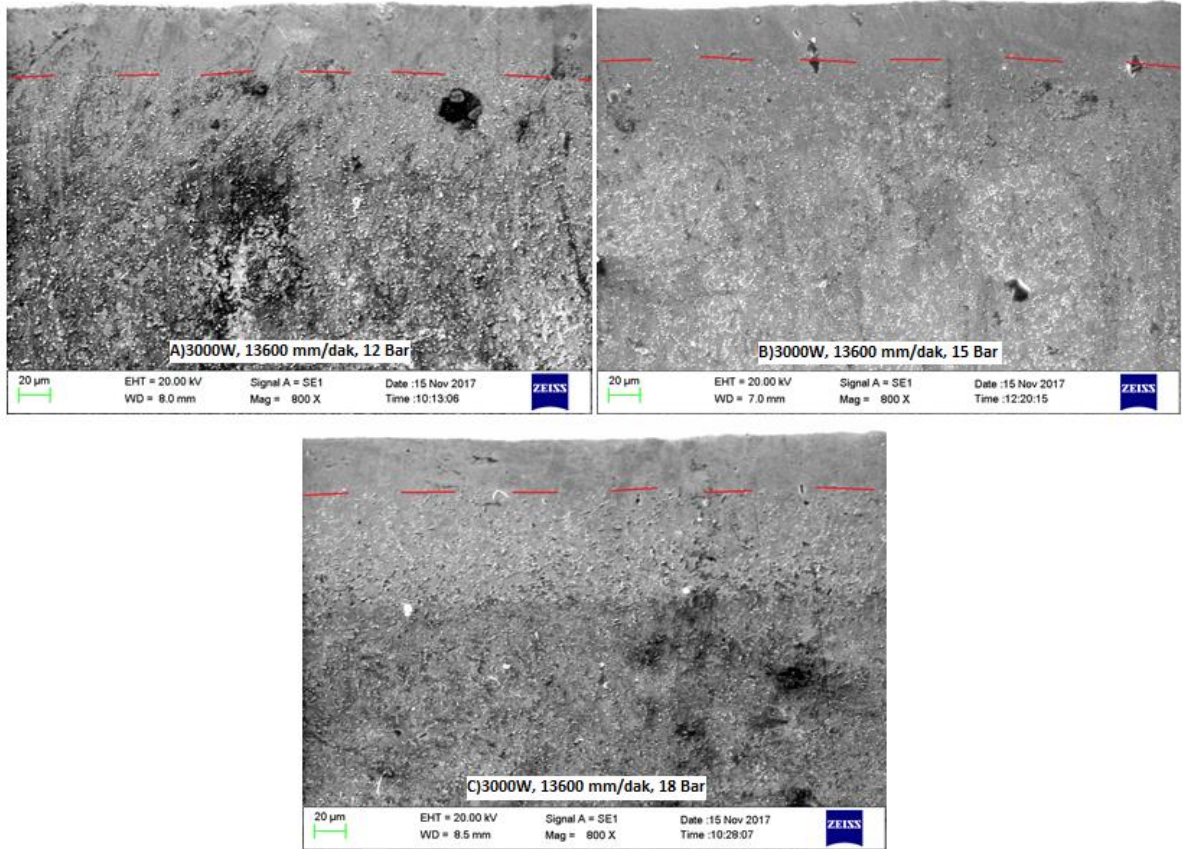
Şekil 6.11.1. W=3000 watt için YKTK'nın gaz basıncına bağlı değişimi



Şekil 6.11.2. W=3500 watt için YKTK'nın gaz basıncına bağlı değişimi



Şekil 6.11.3. W=4000 watt için YKTK'nın gaz basıncına bağlı değişimi



Şekil 6.12. Yardımcı gaz basıncının YKTK' ye etkisi (A) 1 nolu numune, B) 2 nolu numune, A) 3 nolu numune)

6.2.3. Kerf Genişliği Ölçüm Sonuçları

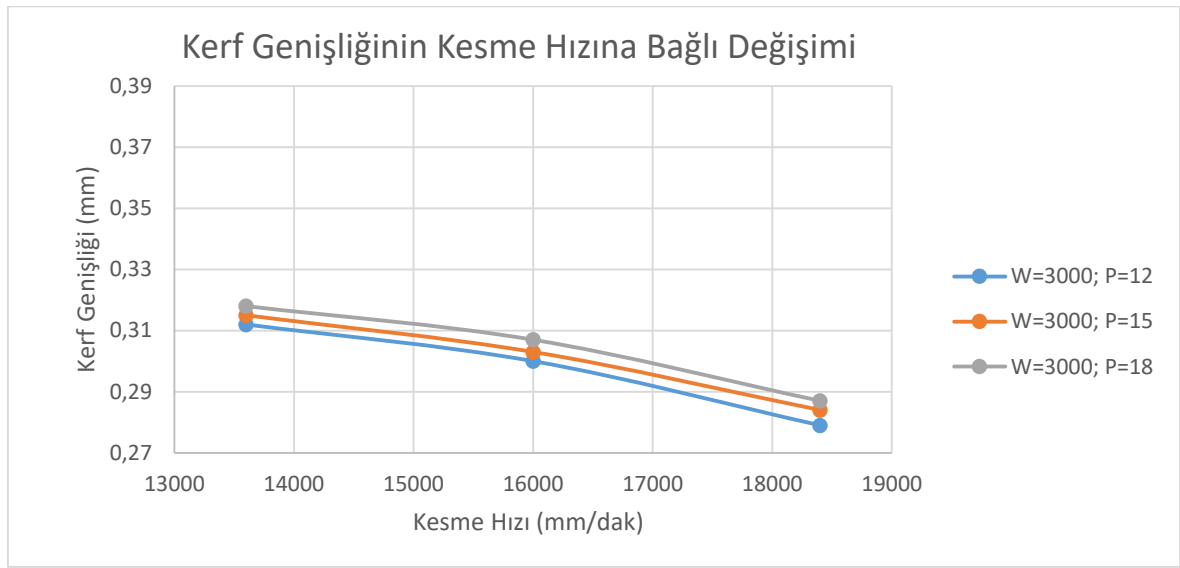
Lazer ile kesme işleminde kesme kalitesini belirleyen kerf genişliği ve eğim açısı değerlerinin belirlenmesi amacıyla her bir kesim için alt ve üst kerf genişlikleri kerf boyunca beş ayrı noktadan mikroskopla ölçülmüş ve bu ölçümlerin ortalama değerleri alınarak söz konusu kerf genişlik değeri belirlenmiştir. Tablo 6.3’ de numunelerin ölçülen ortalama üst ve alt kerf genişlikleri toplu olarak verilmiştir.

Tablo 6.3: Lazer kesim sonrası ölçülen ortalama kerf genişlikleri

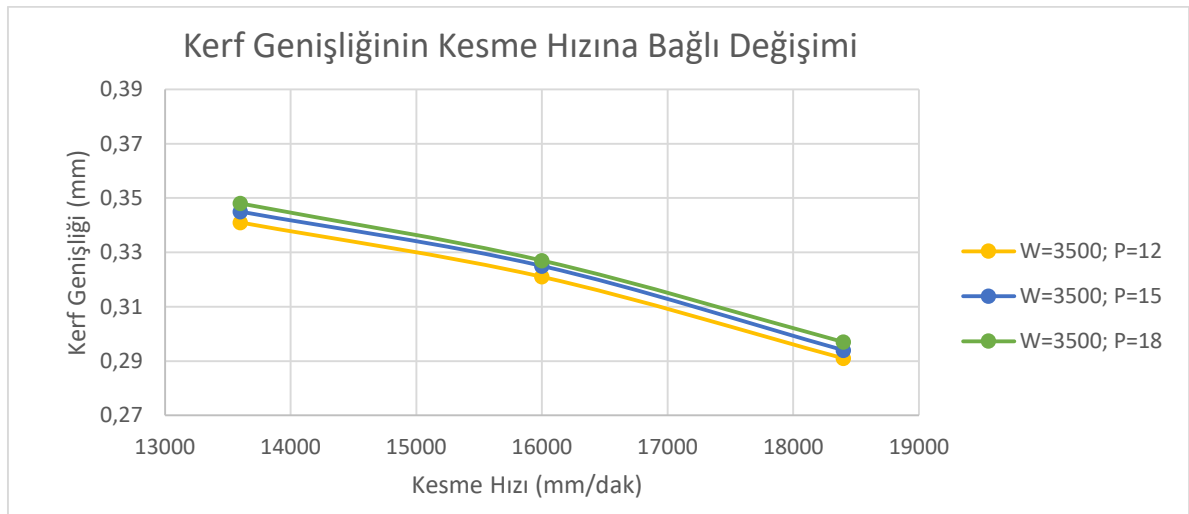
Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)	Ortalama Üst Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Alt Kerf Genişliği (mm)
1	3000	13600	12	0,312	0,268
2	3000	13600	15	0,315	0,28
3	3000	13600	18	0,318	0,288
4	3000	16000	12	0,3	0,252
5	3000	16000	15	0,303	0,261
6	3000	16000	18	0,307	0,269
7	3000	18400	12	0,279	0,226
8	3000	18400	15	0,284	0,233
9	3000	18400	18	0,287	0,24
10	3500	13600	12	0,341	0,307
11	3500	13600	15	0,345	0,312
12	3500	13600	18	0,348	0,321
13	3500	16000	12	0,321	0,28
14	3500	16000	15	0,325	0,289
15	3500	16000	18	0,327	0,295
16	3500	18400	12	0,291	0,241
17	3500	18400	15	0,294	0,254
18	3500	18400	18	0,297	0,26
19	4000	13600	12	0,365	0,336
20	4000	13600	15	0,372	0,345
21	4000	13600	18	0,378	0,352
22	4000	16000	12	0,351	0,318
23	4000	16000	15	0,354	0,323
24	4000	16000	18	0,362	0,334
25	4000	18400	12	0,33	0,284
26	4000	18400	15	0,333	0,297
27	4000	18400	18	0,337	0,307

6.2.3.1 Kerf Genişliğinin Kesme Hızına Bağlı Değişimi

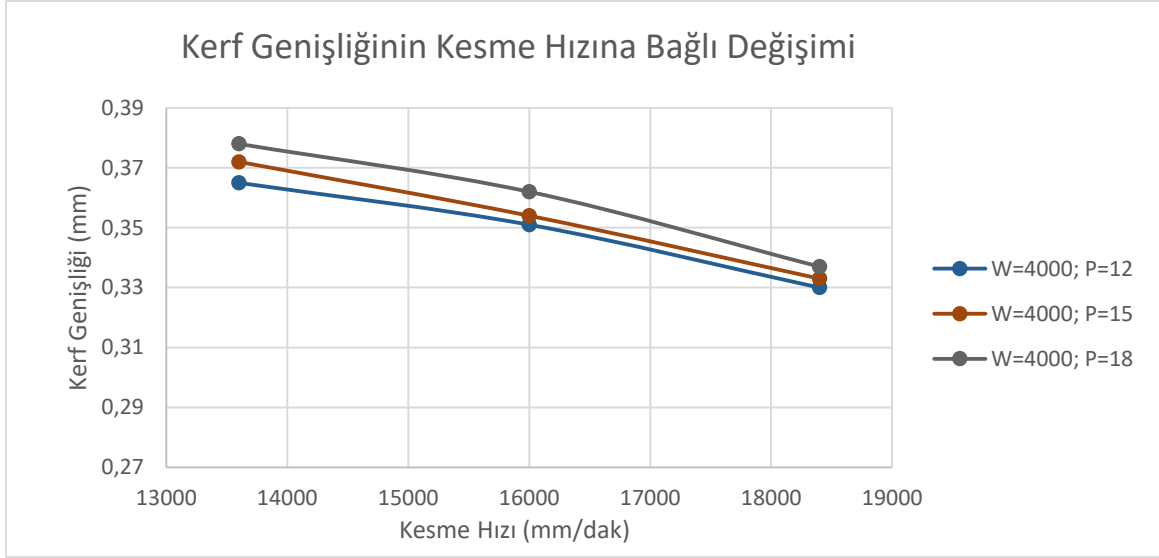
Tablo 6.3’ de verilen ölçüm değerleri kullanılarak elde edilen grafikler şekil 6.13’ de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi kesme hızının artması ile kerf genişliği azalmıştır. Bunun sebebi, Güç yoğunluğuna bağlı malzemede oluşan ısı, düşük hızda daha etkili olduğundan dolayı daha fazla malzeme ergitecektir, yüksek hacimdeki ergiyik malzeme gaz basıncı yardımıyla ortamdan atılarak kerfin genişlemesine sebep olduğu düşünülmektedir. Bu sonuçlar Lamikiz[32], Hamoudi[59] ve Yılbaş[54] tarafından yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir.



Şekil 6.13.1. Güç=3000 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi



Şekil 6.13.2. Güç=3500 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi



Şekil 6.13.3. Güç=4000 watt için kerf genişliğinin kesme hızına bağlı değişimi

6.2.3.2 Kerf Genişliğinin Güce Bağlı Değişimi

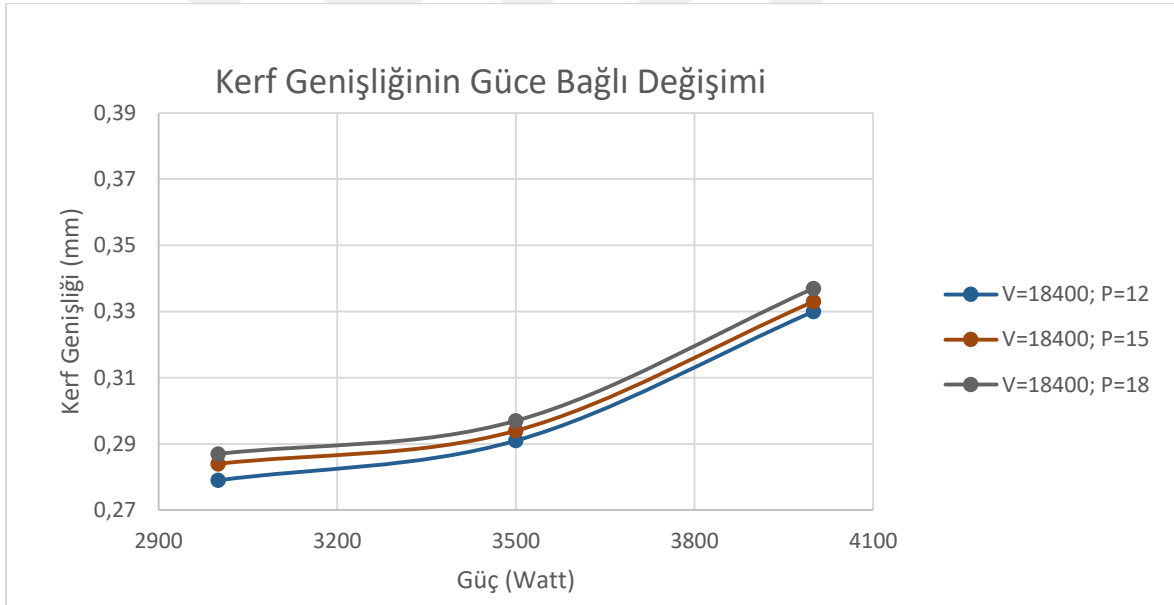
Lazer gücü, birim zamanda (saniyede) lazer ışığı formunda yayılan toplam enerjidir. Lazer ışın yoğunluğu ise, gücün lazerin yoğunlaştırıldığı alana bölünmesiyle elde edilen bir parametredir. Lazer gücünün artması ile ısı girdisi arttığından kerf genişliğinde artış oluşturmaktadır. Bunun nedeni fazla güç tabakaya daha yüksek ısı transferi ve daha fazla malzeme eritmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar A.K. Dubey[58], B. S. Yılbaş[54] ve K. A. Ghany[57]' in konuyla ilgili çalışmalarıyla örtüşmektedir. Tablo 6.3' deki güç değerlerine ait grafikleri şekil 6.14' de verilmiştir.



Şekil 6.14.1. V=13600 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi



Şekil 6.14..2 V=16000 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi



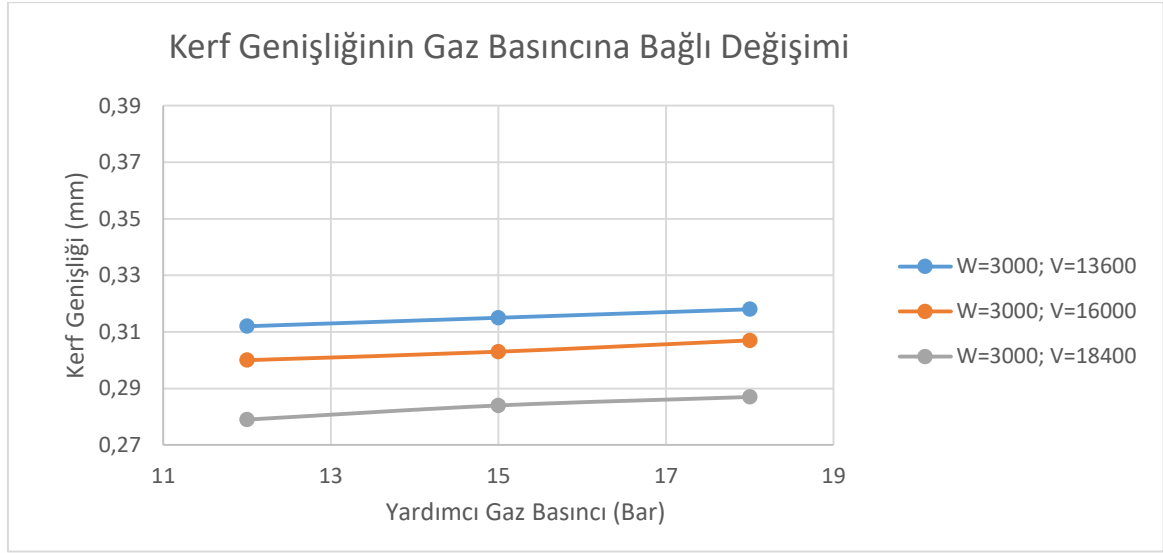
Şekil 6.14.3. V=18400 mm/dak için kerf genişliğinin güce bağlı değişimi

6.2.3.3 Kerf Genişliğinin Gaz Basıncına Bağlı Değişimi

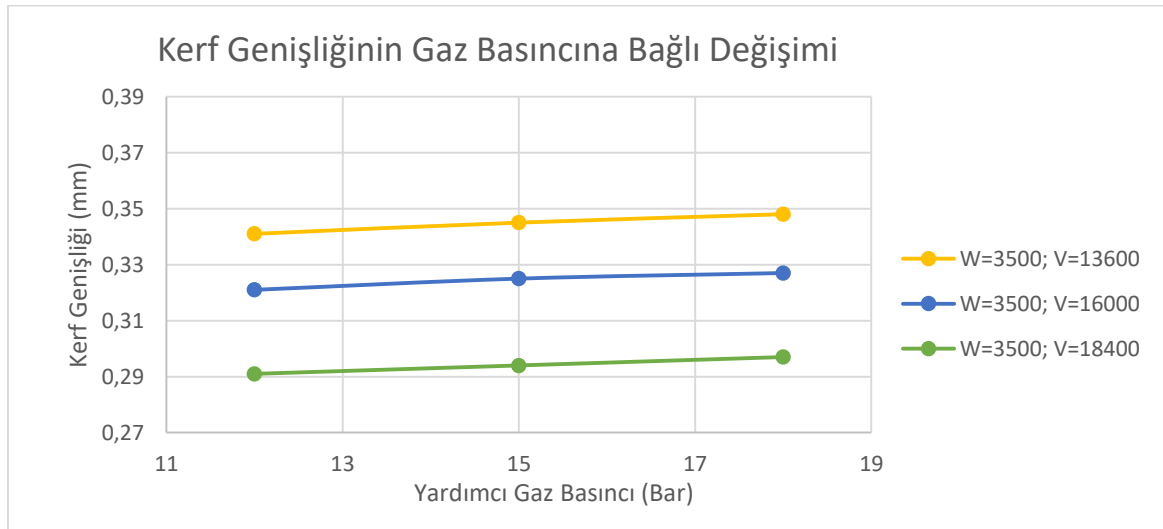
İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yaygın olarak kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajları ile birlikte oksijen (aktif gaz) ve nitrojendir. Tamamen asal olmamasına rağmen, nitrojen ucuz olması sebebiyle yaygın bir şekilde işlem gazı olarak kullanılır. Soy gazlardan argon ve helyum titanyum

kesiminde kullanılır. Çünkü bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önler.

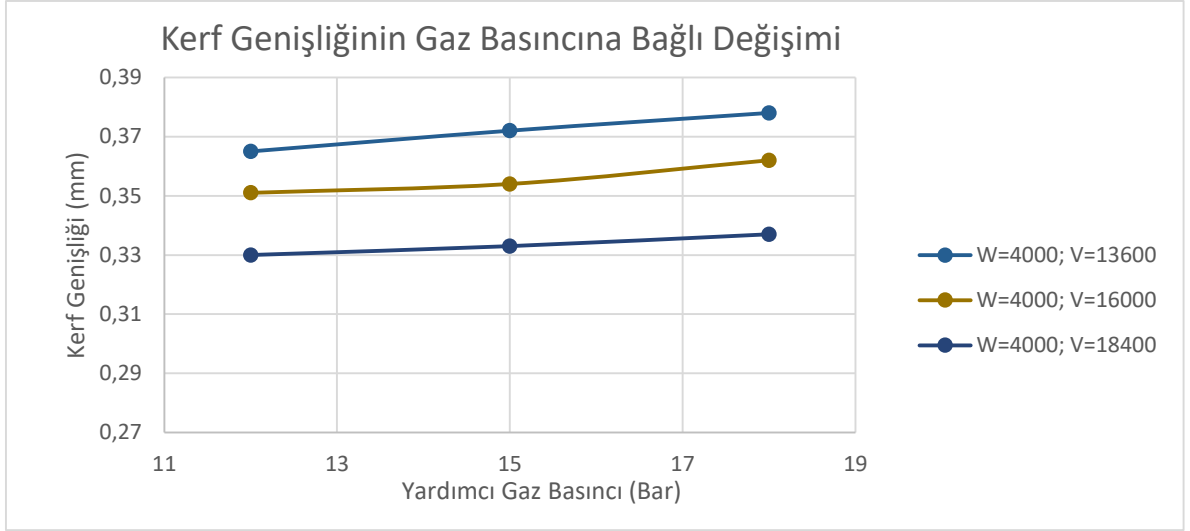
Yüksek yardımcı gaz basıncı kesme kanalından uzaklaştırılan ergimiş metal kütlesini artırır ve havadaki oksijen konsantrasyonunu düşürerek kesme bölgesinde meydana gelecek oksidasyonu önlemektedir. Yüksek güç değerlerinde, oluşan sıcaklığa bağlı olarak daha fazla malzeme ergitilir ve böylelikle gaz basıncı yardımıyla da kesme bölgesinden daha fazla malzeme kaldırılmış olur ve sonuç olarak gaz basıncını arttırmak kesme genişliği artırdı. Benzer sonuçlar B.S. Yilbas[54]' ın bu konudaki çalışmasında elde edilmiştir. Tablo 6.3' deki basınç değerlerine ait grafikleri şekil 6.15' de verilmiştir.



Şekil 6.15.1. W=3000 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi

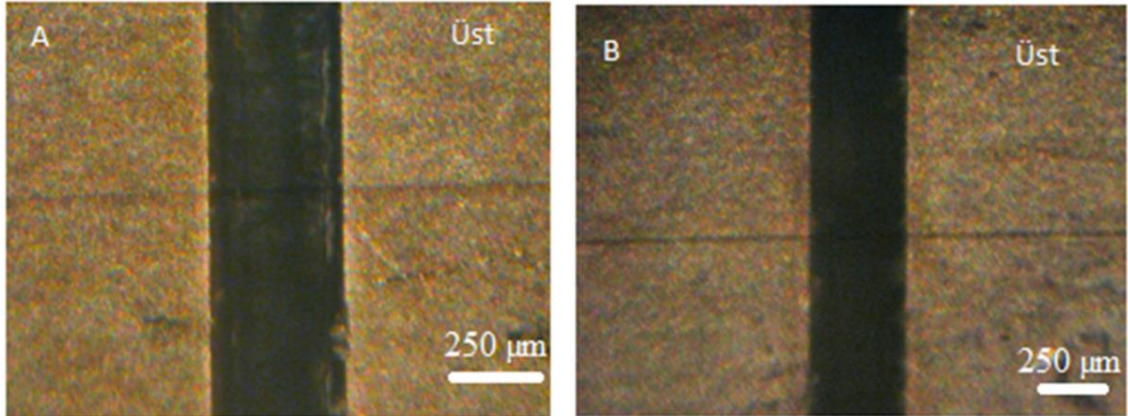


Şekil 6.15.2. W=3500 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi



Şekil 6.15.3. W=4000 watt için kerf genişliğinin gaz basıncına bağlı değişimi

Numuneler içerisinde en yüksek kerf genişliği hızın en düşük, güç ve basıncın en yüksek olduğu (W=4000 watt, V=13600 mm/dak, P=18 bar) 21 no lu deney de 0,378 mm olarak ölçülmüştür. En düşük kerf genişliği ise hızın en yüksek, güç ve basıncın en düşük olduğu (W=3000 watt, V=18400 mm/dak, P=12 bar) 7 no lu deney de 0,279 mm olarak ölçülmüştür. Bu numunelere ait görüntü şekil 6.16' de verilmiştir.



Şekil 6.16. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf genişliğine etkisi
(a: 21 nolu deney w=4000 watt, v=13600 mm/dak, p=18 bar b: 7 nolu deney; w=3000 watt, v=18400 mm/dak, p=12 bar,)

6.2.4. Kerf Eğim Açısı Ölçüm Sonuçları

Fiber lazerde kesilen numunelerin alt ve üst kerf genişliği ölçüm sonuçlarında, bütün kesme şartlarında da alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha küçük olduğu ve bu da lazer ışını ile kesmede kesme kanalının konik bir profilde olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Alt ve üst kerf genişliğinde meydana gelen bu değişimin, kesme kalınlığı boyunca ışın yoğunluğunun ve gaz basıncının düşmesi, ışın odağının bozulması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.[55] Lazer ışını ile kesmede, kerf genişliği (K_a , $K_{\bar{u}}$) ve kerf eğim açısı (K_{ea}) kesim kalitesini belirleyen temel karakteristiklerdir. Tablo 6.4’ de 27 adet Ti6Al4V numunesinin ortalama kerf eğim açısı değerleri toplu olarak verilmiştir.

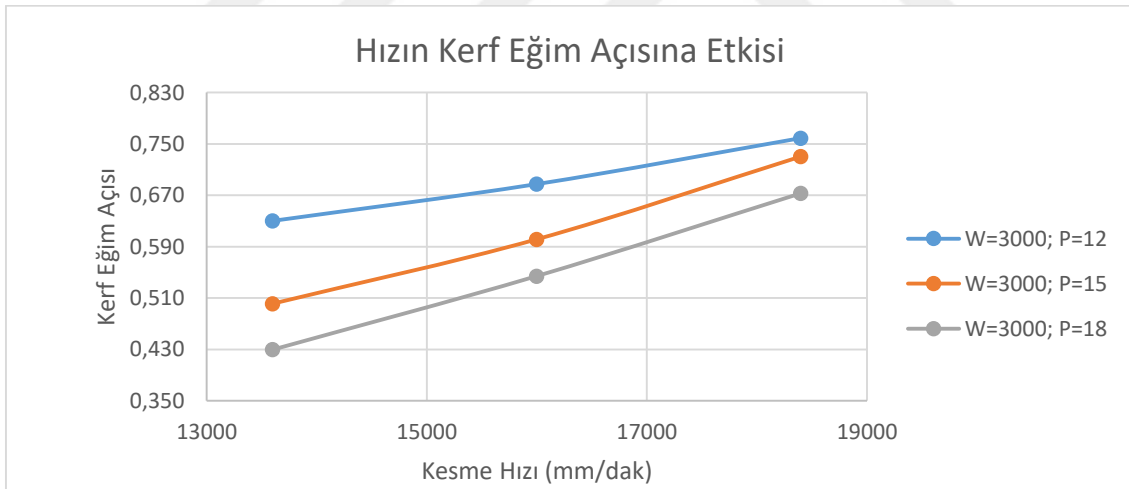


Tablo 6.4: Lazer ışını ile kesim sonrasında ölçülen ortalama kerf eğim açısı değerleri

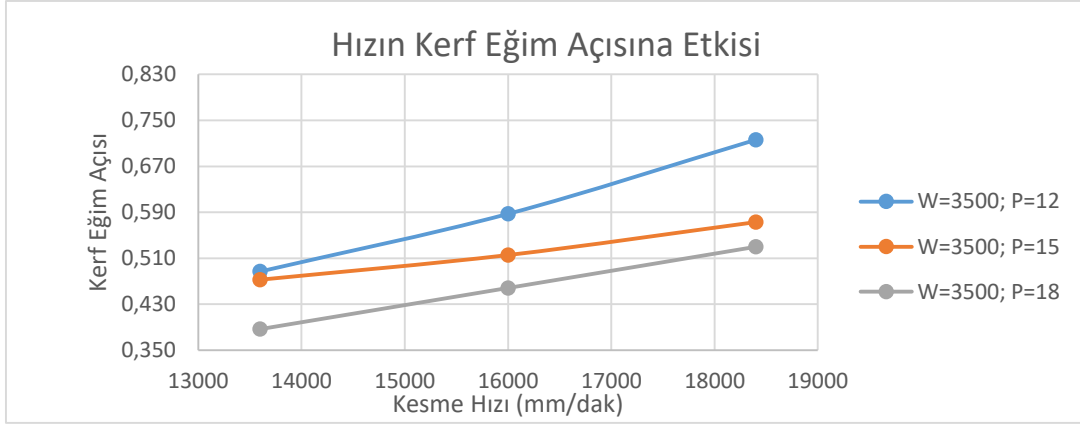
Deney No	Güç (Watt)	Kesme Hızı (mm/dakika)	Yardımcı Gaz Basıncı (Bar)	Ortalama Üst Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Alt Kerf Genişliği (mm)	Ortalama Kerf Eğim Açısı (°)
1	3000	13600	12	0,312	0,268	0,63
2	3000	13600	15	0,315	0,28	0,501
3	3000	13600	18	0,318	0,288	0,43
4	3000	16000	12	0,3	0,252	0,688
5	3000	16000	15	0,303	0,261	0,602
6	3000	16000	18	0,307	0,269	0,544
7	3000	18400	12	0,279	0,226	0,759
8	3000	18400	15	0,284	0,233	0,731
9	3000	18400	18	0,287	0,24	0,673
10	3500	13600	12	0,341	0,307	0,487
11	3500	13600	15	0,345	0,312	0,473
12	3500	13600	18	0,348	0,321	0,387
13	3500	16000	12	0,321	0,28	0,587
14	3500	16000	15	0,325	0,289	0,516
15	3500	16000	18	0,327	0,295	0,458
16	3500	18400	12	0,291	0,241	0,716
17	3500	18400	15	0,294	0,254	0,573
18	3500	18400	18	0,297	0,26	0,53
19	4000	13600	12	0,365	0,336	0,415
20	4000	13600	15	0,372	0,345	0,387
21	4000	13600	18	0,378	0,352	0,372
22	4000	16000	12	0,351	0,318	0,473
23	4000	16000	15	0,354	0,323	0,444
24	4000	16000	18	0,362	0,334	0,401
25	4000	18400	12	0,33	0,284	0,659
26	4000	18400	15	0,333	0,297	0,516
27	4000	18400	18	0,337	0,307	0,43

Tablo 6.4’ deki değerlere ait grafikler şekil 6.14’ da verilmiştir. Tablo ve grafiklerden de görüldüğü gibi numunelere ait ortalama kerf eğim açısı, Yüksek kesme hızlarında, düzensiz kesme yüzeylerinin oluşması buna bağlı olarak da malzeme kerf eğim açıları önemli derecede artmaktadır. Çünkü yüksek kesme hızları, malzemenin lazer ışınının

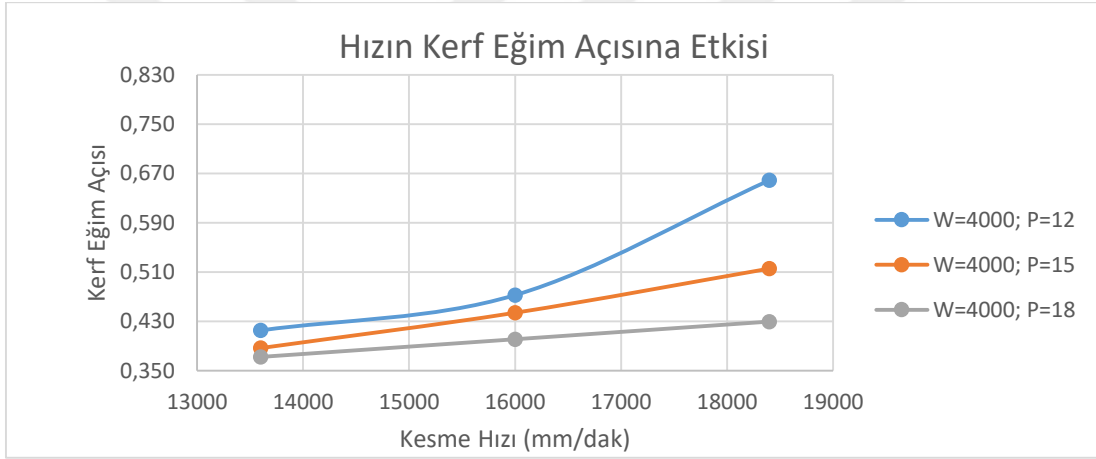
kesme/aşındırma etkisine maruz kaldığı zamanı azaltır ve malzeme üzerindeki bir noktanın daha az süre lazer ışını etkisinde kalmasına sebep olur. Böylelikle kesilen yüzeyde birim alana düşen partikül sayısı azalır ve sonuç olarak düzensiz kesme yüzeyleri elde edilir ve kerf eğim açısı artar Şekil 6.17’ daki grafikler incelendiğinde kesme hızının kerf eğim açısı üzerindeki etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, kerf eğim açısının, artan güç yoğunluğu ve gaz basıncıyla da düştüğü tespit edilmiştir. Lazer ışınının yoğunluğunun, yüksek kesme hızlarında daha da azalması sonucunda parçanın alt kısımlarına doğru ergitilen malzeme miktarı düşer ve alt kerf genişliğiyle üst kerf genişliği arasında fark oluşur. Ayrıca, güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda kerf eğim açısının değeri önemli derecede düşmektedir. Bunun sebebi, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli etkileşim süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca eriyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaşmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da örtüşmektedir[53, 55].



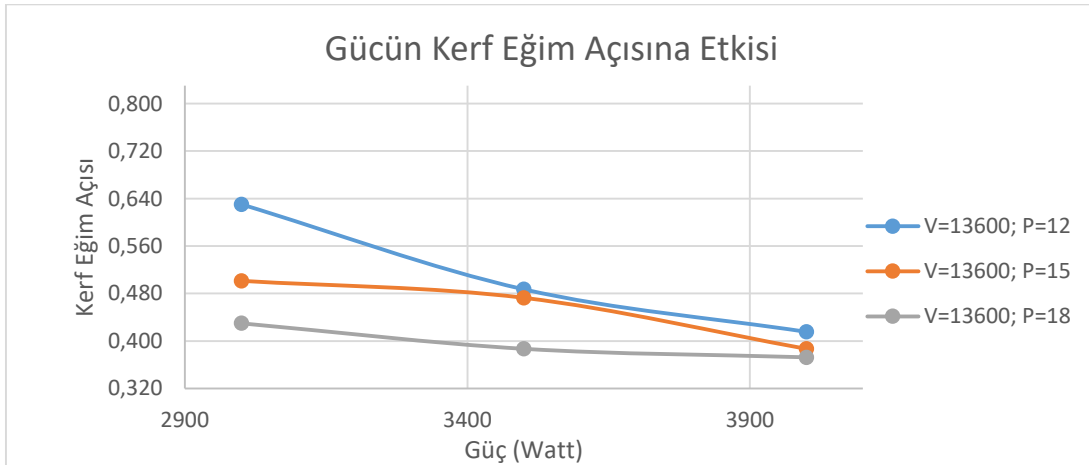
Şekil 6.17.1.1. W=3000 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi



Şekil 6.17.1.2. W=3500 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi



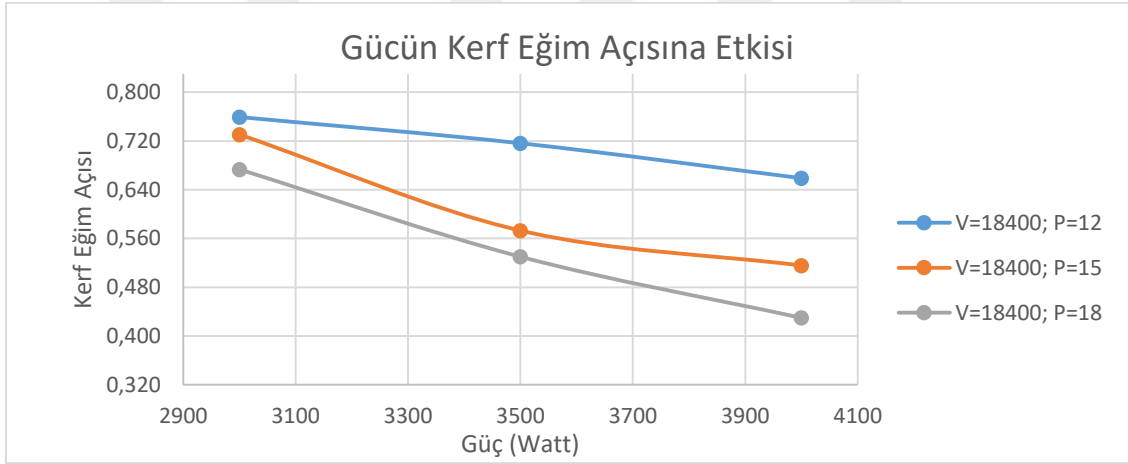
Şekil 6.17.1.3. W=4000 watt için kerf eğim açısının kesme hızına bağlı değişimi



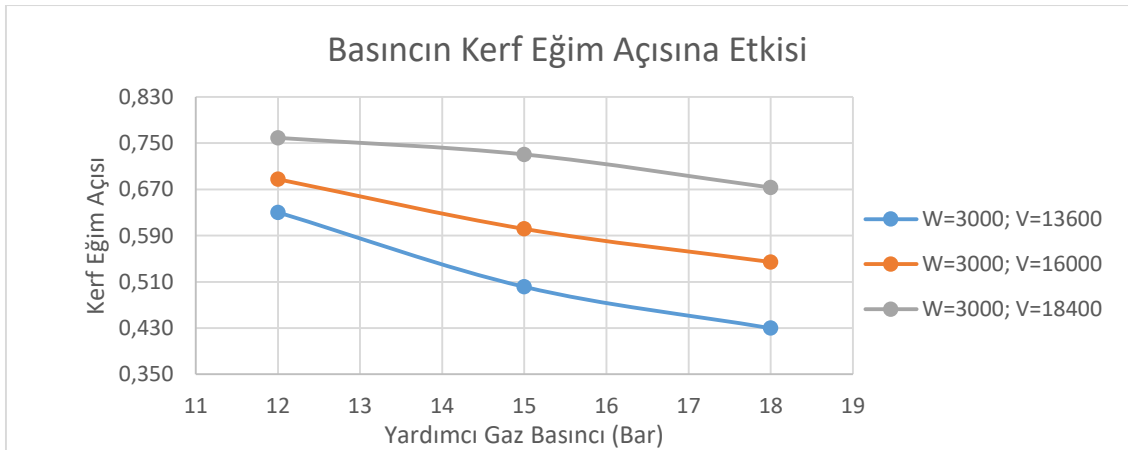
Şekil 6.17.2.1. V=13600 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi



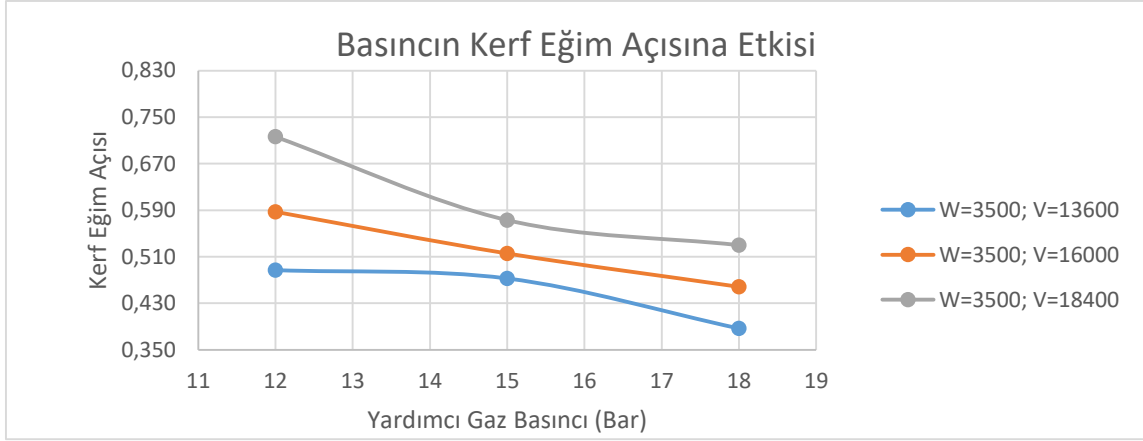
Şekil 6.17.2.2. V=16000 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi



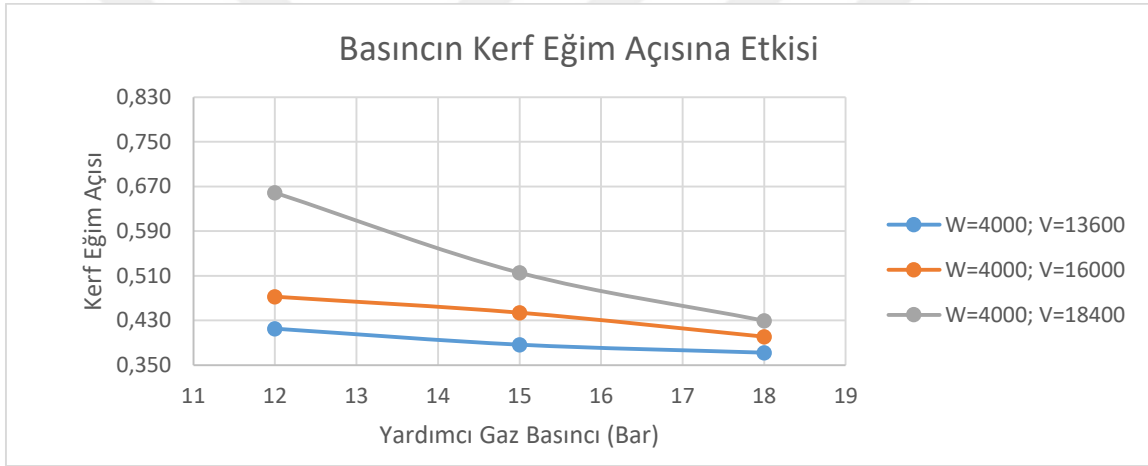
Şekil 6.17.2.3. V=18400 mm/dak için kerf eğim açısının güce bağlı değişimi



Şekil 6.17.3.1. W=3000 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi

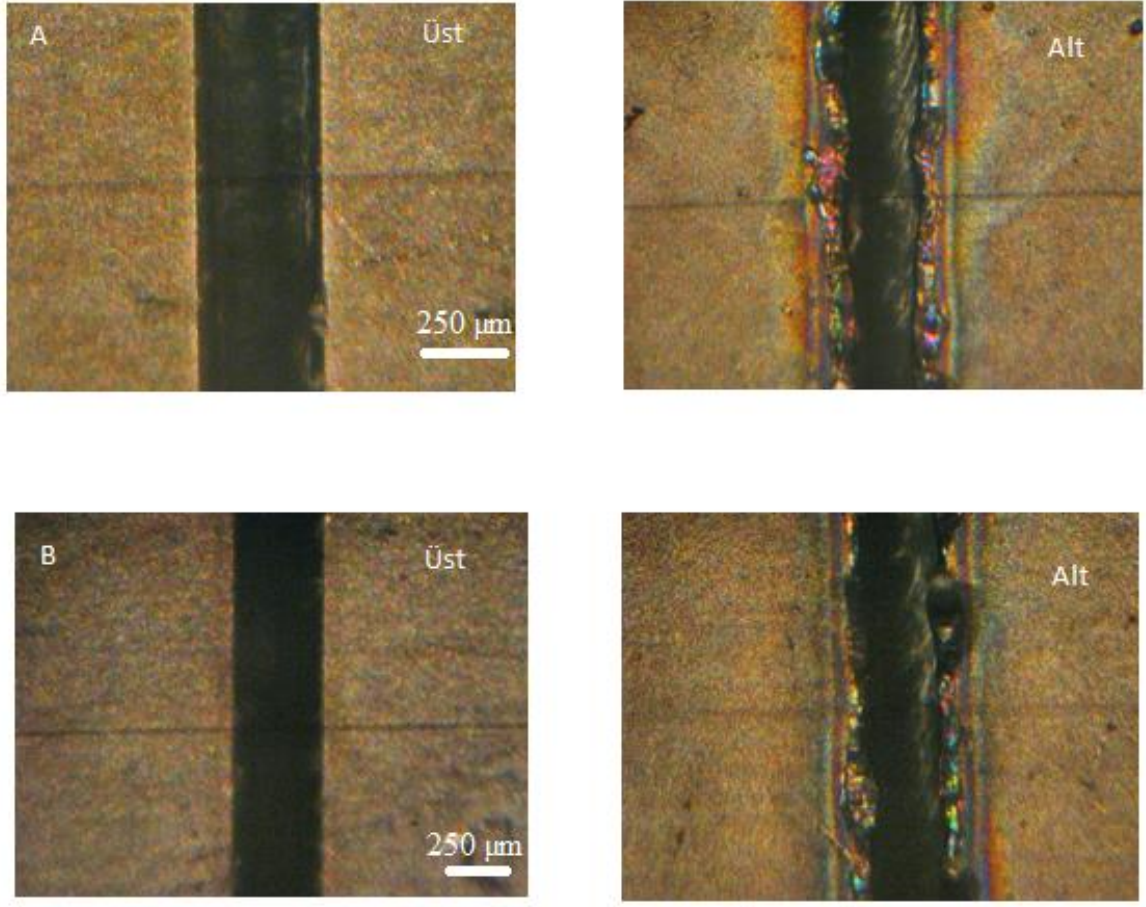


Şekil 6.17.3.2. W=3500 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi



Şekil 6.17.3.3. W=4000 watt için kerf eğim açısının gaz basıncına bağlı değişimi

Şekil 6.18' de lazer ışını ile kesilen numuneler içerisinde, kesim parametrelerine bağlı olarak değişen en düşük ve en yüksek kerf eğim açısının elde edildiği numunelere ait fotoğraflar verilmiştir. En yüksek ortalama kerf eğim açısı, kesme hızının en yüksek (18400 mm/dakika), gaz basıncının ve lazer gücünün en düşük (12 Bar, 3000 Watt) olduğu 7 nolu deneyde 0,759° olarak ölçülürken; En düşük ortalama kerf eğim açısı, gaz basıncının ve lazer gücünün en yüksek (18 Bar, 4000 W), kesme hızının en düşük olduğu (13600 mm/dk) 21 nolu deneyde 0,372° olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.18. Lazer kesimde işlem parametrelerinin kerf eğim açısına etkisi
(a: 7 nolu deney; $v=18400$ mm/dak, $w=3000$ watt, $p=12$ bar, b: 21 nolu deney $v=13600$ mm/dak, $w=4000$ watt, $p=18$ bar)

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımı, fiber lazer yöntemleri ile işlenmiştir. Yapılan araştırma ve incelemelerde aşağıda belirtilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Lazer ışını ile kesilmiş numunelerin yüzey kesitleri incelendiğinde, üç farklı tabakanın oluştuğu görülmüştür. Bunlar; YKT, IEB ve EA'dır. YKTK özellikle lazer gücüne bağlı olarak önemli derecede artmakta ve kesme hızının artmasıyla azalmaktadır. Sonuç olarak gücün yüksek ve hızın yavaş olması durumunda tabakaya daha yüksek ısı transferi gerçekleşir ve daha fazla malzeme ergimesine sebep olur, ergiyen kısım soğur ve YKTK artar. Yapılan deneyler sonucunda en dar YKTK, lazer gücünün en düşük (3000 W), kesme hızının ise en yüksek olduğu (18400 mm/dk) 7 nolu deney numunesinde elde edilmiştir.
- Ortalama kerf genişliği; kesme hızı azalırken güç artışıyla kademeli olarak artmaktadır. Yoğun ısı sonucu ergiyen malzeme, gaz basıncı yardımıyla ortamdan atılarak kerf genişlemesine sebep olmaktadır.
- Ortalama kerf genişliğinin yükselmesinde güç ve hızın etkisi önemli rol oynarken gaz basıncının da kısmen etkili olduğu belirlenmiştir. Gaz basıncının artmasına paralel olarak kerf genişliği de artmaktadır.
- Deneyler sonucunda kerf genişlik değerlerindeki değişimlerin güç ve yardımcı gaz basıncı ile doğru, kesme hızı parametresiyle ters orantılı olduğu saptanmıştır. Numuneler içerisinde en yüksek ortalama kerf genişliği, kesme hızının en düşük, güç ve basıncın en yüksek olduğu (W=4000 watt, V=13600 mm/dak, P=18 bar) 21 no lu deney de 0,378 mm olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama kerf genişliği ise hızın en yüksek, güç ve basıncın en düşük olduğu (W=3000 watt, V=18400 mm/dak, P=12 bar) 7 no lu deney de 0,279 mm olarak ölçülmüştür.
- Kerf eğim açısı; güç ve yardımcı gaz basıncının yüksek, kesme hızının düşük olduğu durumda önemli derecede düşmektedir. Bunun nedeni, lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında yeterli temas süresinin olması ve bu süre içinde malzeme kalınlığı boyunca ergiyen metalin yüksek gaz basıncı yardımı ile alt kısımda katılaşmadan kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. . En yüksek ortalama kerf eğim açısı, kesme hızının en yüksek (18400 mm/dakika), gaz basıncının ve lazer gücünün en düşük (12

Bar, 3000 Watt) olduğu 7 nolu deneyde 0,759° olarak ölçölürken; En düşük ortalama kerf eğim açısı, gaz basıncının ve lazer gücünün en yüksek (18 Bar, 4000 W), kesme hızının en düşük olduğu (13600 mm/dk) 21 nolu deneyde 0,372° olarak ölçölmüştür.



KAYNAKLAR

1. Tanrıverdi M.A. 1995. Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa
2. Wandera, C. 2010. Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium. *Ph.D Thesis*, Department of Metal Technology, Lappeenranta University of Technology, , Lappeenranta, Finland
3. Sprangle, P., Ting, A., Penano, J., Fischer, R., Hafizi, B. 2008. High power fiber lasers for directed- energy applications. *NRL REVIEW* 89-99
4. Erdoğan, Ş. 2010. Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği, Ankara
5. Bates, R. J. 2001. *Optical Switching and Networking Handbook*. 5-10
6. Ippen E. P. and Stolen, R. H. 1972. *Appl. Phys. Lett.*, 21, 539
7. Stolen, R. H., Ippen, E. P. and Tynes, A. R. 1972. *Appl. Phys. Lett.* 20, 62
8. Stolen R. H. and Ashkin, A. *Appl. 1973. Phys. Lett.* 22, 294
9. Stolen, R. H., Bjorkholm, J. E. and Ashkin, A. 1974. *Appl. Phys. Lett.* 24, 308
10. Hill, K. O., Johnson, D. C., Kawaski, B. S. and MacDonald, R. I. *J. Appl. Phys.* 1974 49, 5098,
11. Fork, R. L., Brito C. H. Becker, P. C. And Shank, C. V. 1996. *Opt. Lett.* 12, 483-1987.
12. Smith, N. J., Knox, F. M., Doran, N. J., Blow, K. J. and Bennion, I. *Electron. Lett.* 32, 54
13. Ilday, F. Ö., Buckley, J. R., Clark, W. G. and Wise, F. W. 2004. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser, *Phys. Rev. Lett.*, 92, 3902-3905
14. Chong, A., Buckley, J., Renninger, W. and F Wise, 2006. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser, *Opt. Exp.* 14, 10095-10100
15. Oktem, B., Ülgüdür, C., and Ilday, F. Ö. 2010. Soliton-similariton fiber laser, *Nature Photonics*, 4, 307,
16. <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/optical-fiber-attenuation> 20/11/2012

17. Snitzer, E., Po, H., Hakimi, F., Tumminelli, R., McCollum, B. C. 1988. Double clad o_set core Nd fiber laser", Optical Fiber Sensors Topical Meeting, New Orleans, Louisiana/USA, paper PD 5
18. <http://www.3spgroup.com/data/File/ITFLabs/Posters>. 10/10/2012
19. Akçaalan, Ö., 2013. Hızlandırıcı uygulamalarına yönelik elektron demeti üretimi için küme-modlu fiber lazer sisteminin geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
20. <http://www.rp-photonics.com/acoustoopticmodulators.html>. 17/10/2012
21. <http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic-modulator>. 21/02/2011
22. A. E. Turner, R. L. Gunshor, and S. Datta., 1983. New class of materials for optical isolators, 22, 3152-3154
23. <http://en.wikipedia.org/wiki/Optical-isolator>. 10/08/2012
24. <https://tr.wikipedia.org/wiki/Fiberlazer>. 11/10/2012
25. Erhardt, M., Heine, A., Prommersberger, H., 1993. Laser in der Materialbearbeitung: Grundlagen des Lasers-Laseranlagen- Lasermaterialbearbeitung-Sicherheitsvorschriften und Arbeitsschutz, Vogel Buchverlag, ISBN 3-80230480-2
26. Rajaram. N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S.H., 2003. CO2 laser cut quality of 4130 steel, Int. J. Machine Tools Manuf. 43 351-358.
27. Wang, J., Wong. W.C.K., 1999. CO2 laser cutting of metallic coated sheet steels, J. Mater. Process. Technol. 95, 164-168.
28. Steen, W.M., 1991. Laser Material Processing, Springer
29. Yilbas, B.S., 2001. Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process, in: Proceedings of the First MECH E Part B, J. Eng Manuf 215, 10, 1357-1365
30. Bitsel, H. E., 1996. The Fascinating World of Sheet Metal, TRUMPF, Germany
31. Powwel, J., 1998. CO2 Laser Cutting, Springer, Germany
32. Lamikiza, A., Lo'pez de Lacallea, L.N., Sa'ncheza, J.A., Pozop, D., Etayoa, J.M., Lo'peza, J.M., 2005. CO2 Laser Cutting of advanced high strenght steels (AHSS), Applied Surface Science 242, 362-368.
33. Karaaslan, A. 2009. Laser İle Malzeme İşlemleri, İstanbul
34. John, C. I., 2009. Laser Processing of Engineering materials, ISBN 0 7506 6079 1, 347-365

35. Hgel, H., 2000. New solid-state lasers and their application potentials, Optics and Lasers in Engineering, 34, 213-229
36. Wandera, C., 2010. Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium, 33-44
37. Yilbas, B. S., Davies R. and Yilbas Z., 1992. Study into penetration speed during CO2 laser cutting of stainless steel, Optics and Lasers in Engineering, 17, 69-82
38. Anon., 2010. Facts about: Laser cutting techniques, AGA Group Ltd, 4-12
39. Sle, P., 2013. Dk güçlü fiber lazer diyotlu kesme sistemlerinde ıın kalite faktrnn iyiletirilmesi , Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi FenBilimleri Enstitüsü, Bursa
40. http://info.tuwien.ac.at/iflt/safety/misc/ba_3_1.htm, referenced 29/09/2005
41. Dirk, P., 2001. Laser Cutting, LIA Handbook of Laser Materials Processing, Ist edition, Laser Institute of America, ISBN 0-912035-15-3, 425-433
42. Wandera, C. 2006. Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam, 33-34
43. Ivarson, A. 1993. On the physics and chemical thermodynamics of laser cutting, Luleå University of Technology, Sweden. 114D, ISSN 0348-8373. 35-37, 73-74, 105-124
44. Rajendran, N.,. Dissertation, P.D. 1990. An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process”, Iowa State University, U.M.I Dissertation Information Service, Order Number 9100495, Syf. 1, 10-12, 69
45. John, P. 1993. CO2 Laser Cutting, Springer Verlag, 1-6,183-184
46. Akaalan, . 2013. Hızlandırıcı Uygulamalarına Ynelik Elektronik Demeti retimi İçin Kme-Modlu Fiber Lazer Sisteminin Gelitirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
47. Gabzdyl J. T., 1996 “Effects of gases on laser cutting of stainless steels”, In Laser Materials Processing: Proceedings of the International Congress on Applications of Lasers & Electro- Optics ICALEO '96 held in Detroit, Michigan, USA; 14-17, 39-44
48. Yilbas, B. S., Davies, R., and Yilbas Z. 1992. Study into penetration speed during CO2 laser cutting of stainless steel, Optics and Lasers in Engineering, 17, 69-82
49. Fieret J., Terry M. J. and Ward B. A. 1987. Overview of flow dynamics in gas assisted laser cutting”, Presented in the fourth International Symposium on optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering, Topical Meeting on High

- Power Lasers: Sources, Laser-Material interactions, High Excitations, and Fast Dynamics in Laser Processing and Industrial Applications, The Hague, The Netherlands, (Culham laboratories) report CLM-P 818
50. Chen, K., Yao L. Y., ve Modi V. 2000. Gas jet – Work piece interactions in laser machining Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122, 429 – 438
51. Ketting, H. O. and Olsen, F.O. 1992. High pressure off-axis laser cutting of stainless steel and aluminum, Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing (Science and Applications), 92, 7-12 Nagaoka, Japan, ISSN 0918-2993, 607-612
52. Granberg, N. A. C. 2015. Laser cutting in Ti-6Al-4V sheet: DOE and evaluation of process parameters Informative, Materials and Manufacturing Technology CHALMERS NIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, İsveç
53. Shanjin, Lv. and Yang, W. 2006. An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, Optics and Lasers in Engineering 44 1067–1077
54. Yilbas, B. S. 2004. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis, Journal of Materials Processing Technology 155-156 2106-2115
55. Ay, M. 2013. İnconel 718 nikel alaşımasının elektro-termal işleme yöntemleriyle işlenebilirliğinin araştırılması, Dr. Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 106-111.
56. İloğlu, M. E. 2010. Farklı özelliklerdeki çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde elde edilen kesme aralığının karakterizasyonu, Y. Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 26-52
57. Ghany, K. A. and Newishy, M. 2005. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser, Journal of Materials Processing Technology 168 438-447
58. Dubey, A.K. and Yadava, V. 2008. Laser beam machining—A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture 48 609-628
59. Ismail, R. A., Salim, E. T., Hamoudi, W. K., 2013. Characterization of nanostructured hydroxyapatite prepared by Nd:YAG laser deposition, Materials Science and Engineering: C 3347-52