



**PASLANMAZ ÇELİK MALZEMENİN FİBER LAZERLE
KESİMİNDE TAGUCHI TABANLI GRA METODUYLA
ÇOKLU PARAMETRE OPTİMİZASYONU**

Muhammed ASLAN



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PASLANMAZ ÇELİK MALZEMENİN FİBER LAZERLE KESİMİNDE
TAGUCHI TABANLI GRA METODUYLA ÇOKLU PARAMETRE
OPTİMİZASYONU**

Muhammed ASLAN
0000-0002-2367-5655

Prof. Dr. Nurettin YAVUZ
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

PASLANMAZ ÇELİK MALZEMENİN FİBER LAZERLE KESİMİNDE TAGUCHI TABANLI GRA METODUYLA ÇOKLU PARAMETRE OPTİMİZASYONU

Muhammed ASLAN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Paslanmaz çelik, üstün korozyon direnci, yüksek mekanik özellikleri, yüksek mukavemeti, şekillendirilebilirliği, ısı ve elektriksel iletkenliği nedeniyle denizcilik, havacılık, sıhhi tesisat, endüstriyel ekipman ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak tercih edilen bir malzeme türü haline gelmiştir. Bu çalışmada, kesme hızı, odak konumu, frekans ve görev döngüsü gibi fiber lazer kesim parametrelerini optimize etmek için Gri İlişkisel Analize (GRA) dayalı çok amaçlı bir optimizasyon yöntemi gerçekleştirilmiştir. Lazer kesim kalitesini belirleyen en önemli iki parametre olan yüzey pürüzlülüğü ve çentik genişliği aynı anda optimize edilmiştir. Her bir parametre için ayrı ayrı optimum seviyeyi belirlemek amacıyla Taguchi tekniği uygulanmıştır. 3D optik profilometre ile Gri İlişki Derecesine (GRA) bağlı olarak kesme yüzeyi morfolojisi incelenmiş ve kesme yüzeylerinin haritaları oluşturulmuştur.

ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü ve çentik genişliği üzerinde en etkili parametrenin sırasıyla %49,01 etki oranı ile Duty cycle ve %31,2 etki oranı ile frekans olduğu görülmüştür. Çoklu yanıtlar üzerinde ise %18,55'lik etki oranı ile frekans en önemli parametredir. Görev döngüsü (Duty cycle) ve odak konumu (Focal position) sırasıyla ikinci ve üçüncü etkili parametrelerdir. 20 mm kalınlığındaki AISI 304 (DIN EN 1.4301) malzemenin fiber lazer kesiminde minimum yüzey pürüzlülüğü ve minimum kerf genişliği için optimum parametrelerin kesme hızı için 310 mm/dak, odak konumu için -11 mm, frekans için 105 Hz ve Duty cycle için de %60 olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lazer Kesim, Paslanmaz Çelik, Parametre Optimizasyonu, Taguchi, GRA.

2023, x + 108 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION IN FIBER LASER CUTTING OF STAINLESS-STEEL PLATES USING TAGUCHI-BASED GREY RELATIONAL ANALYSIS

Muhammed ASLAN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Nurettin YAVUZ

Stainless steel has become a widely preferred material type in the marine, automotive, aerospace, sanitary, aeronautics, industrial equipment and construction industries due to their superior corrosion resistance, high mechanic properties, high strength, formability, thermal and electrical conductivity. In this study, a multi-objective optimization method based on grey relational analysis is conducted to optimize the fiber laser cutting parameters of cutting speed, focal distance, frequency and duty cycle. Surface roughness and kerf width, which are the two most important parameters that determine laser cutting quality, are simultaneously optimized. In order to assign the optimum level for each parameter individually, the Taguchi technique was applied. The cutting surface morphology was examined depending on grey relational grade with 3D optical profilometer as well as maps of the cutting surfaces were created.

According to results achieved by ANOVA, the most effective process parameter on kerf width was frequency, with the ratio of 31,2%. Duty cycle found as the most effective parameter on surface roughness with an effect ratio of 49.01%. Additionally frequency is the most important parameter on the multiple responses with an effect of 18.55%. It has been determined that the optimum parameters for minimum surface roughness and minimum kerf width for fiber laser cutting of 20 mm thick AISI 304 (DIN EN 1.4301) material were 310 mm/min for cutting speed, -11 mm for focal position, 105 Hz for frequency and 60% for duty cycle.

Key words: Laser Cutting, Stainless Steel, Parameter Optimization, Taguchi, Grey Relational Analysis

2023, x + 108 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Nurettin YAVUZ ve çalışmanın her aşamasında bilgi ve görüşlerinden faydalandığım çok değerli hocam Doç. Dr. Celalettin YÜCE' ye çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam boyunca destekleyen Bursa Büyükşehir Belediyesi kurumuna şükranlarımı sunarım.

Lazer kesim işlemlerinin gerçekleştirilmesindeki desteklerinden dolayı Nuri Körüstan AŞ'ye ve NUKON firması adına Alper TARKAN ve Özgür ASLAN'A teşekkür ederim.

Test ve analiz çalışmalarında destek veren Karabük Üniversitesi'ne çok teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca olduğu gibi bu uzun ve zorlu süreçte maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen çok kıymetli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed ASLAN
12/01/2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. İmalat Sanayisinde Lazer Kesimin Önemi	3
2.2. Lazerin Çalışma Prensibi ve Lazerle Kesme İşlemi	5
2.2.1. Lazerin Anlamı ve Tarihçesi	5
2.2.2. Lazer Işınının Üretilmesi	6
2.2.3. Lazer Işınının Karakteristik Özellikleri	10
2.2.4. Lazerle Kesme İşlemi	12
2.3. Lazer Türleri	13
2.3.1. Nd:YAG Lazerler	14
2.3.2. CO ₂ Lazerler	15
2.3.3. Disk Lazerler	15
2.3.4. Fiber Lazerler	15
2.4. Fiber Lazer Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları	18
2.5. Lazer Kesim Kalitesi	20
2.5.1. Kerf genişliği	22
2.5.2. Yüzey pürüzlülüğü	23
2.5.3. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB)	24
2.5.4. Kesme Gazları	24
2.5.5. Nozul Tipleri	26
2.6. Lazer Kesme İşleminde Proses Parametreleri ve Etkileri	27
2.6.1. Lazer Gücü ve İlerleme Hızı	33
2.6.2. Odak Mesafesi	34
2.6.3. Frekans	36
2.6.4. Görev Döngüsü	36
2.7. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Lazerle Kesimi	37
2.7.1. Paslanmaz Çeliklerin Genel Özellikleri	37
2.7.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri	40
2.7.3. Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM	42
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemenin Seçimi	42
3.2. Deney Tasarımı	43
3.3. Yöntem	49
3.3.1. Parametre Optimizasyonu	49
3.3.2. Taguchi Metodu	50
3.3.3. Gri İlişkisel Analiz (GRA) Yöntemi	53
3.3.4. Varyans Analizi (ANOVA) Yöntemi	55

4. BULGULAR ve TARTIşMA	57
5. SONUÇ	83
KAYNAKLAR	85
EK 1	92
ÖZGEÇMİş	93



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
CS	Kesme Hızı (mm/dk)
CW	Sürekli Dalga
DC	Görev Döngüsü (%)
F	Frekans (Hz)
FP	Odaklama (mm)
HRB	Yüzey Sertliği (Rockwell B)
KW	Kerf Genişliği (mm)
LG	Lazer Gücü (W)
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (μm)
Rq	Quadratik Ortalama Pürüzlülük Değeri (μm)
Rt	Maksimum Pürüz Derinliği (μm)
Rz	Ortalama Pürüz Derinliği (μm)
SR	Yüzey Pürüzlülüğü (μm)

Kısaltmalar	Açıklama
ANOVA	Varyans Analizi
AISI	Amerikan Demir Çelik Enstitüsü
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
DOE	Deney Tasarımı
DOF	Toplam Serbestlik Derecesi
EN	Avrupa Standartları
GRA	Gri İlişkisel Analiz
GRC	Gri İlişkisel Katsayısı
GRG	Gri İlişkisel Seviyesi
HMK	Hacim Merkezli Kübik
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
RSM	Yanıt Yüzey Metodu
S/N	Signal to Noise Ratio- Sinyal Gürültü Oranı
SS	Paslanmaz Çelik
OA	Ortogonal Dizi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Uyarılmış elektronun enerji seviyesi gösterimi (Tarakçıoğlu, 2004).....	7
Şekil 2.2.	Kendiliğinden emisyon durumu (Tarakçıoğlu, 2004).....	7
Şekil 2.3.	Hareketlendirilmiş yutma durumu (Tarakçıoğlu, 2004).....	8
Şekil 2.4.	Uyarılmış emisyon durumu (Tarakçıoğlu, 2004).....	8
Şekil 2.5.	Lazer üretim cihazının (Rezonatör) temel komponentleri (Wikiwand, 2023).....	9
Şekil 2.6.	Elektromanyetik ışık dağılımı (Tayf) (Anonim, 2023).....	11
Şekil 2.7.	Lazer kesim yöntemi (Wandera, 2011).....	12
Şekil 2.8.	Endüstriyel lazer türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Shiner 2012).....	16
Şekil 2.9.	Farklı tür lazerin işletim maliyetlerinin kıyaslanması (Assuncao vd., 2010).....	17
Şekil 2.10.	Lazer Kesimin Şematik Diyagramı (Webb, 2004).....	21
Şekil 2.11.	Kerf genişliğinin şematik gösterimi (Stournaras, 2009).....	22
Şekil 2.12.	Yüzey Pürüzlülüğü (Leadrp, 2023).....	23
Şekil 2.13.	ITAB şematik gösterimi (Stournaras, 2009).....	24
Şekil 2.14.	Kesim işleminde kullanılan Azot (N ₂) gazı.....	26
Şekil 2.15.	Farklı nozul çeşitleri (Ion, 2005).....	26
Şekil 2.16.	Lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı a) penetrasyon derinliği gösterimi, b) derinlik/genişlik oranı gösterimi (Kannatey-Asibu, E. 2008).....	33
Şekil 2.17.	Odaklama mesafesi şematik gösterimi (Civilmint, 2023).....	34
Şekil 2.18.	Gaussyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları (Prakash ve Kumar 2017).....	35
Şekil 2.19.	Görev döngüsü (Gophotonics, 2023).....	36
Şekil 3.1.	Vento Linear 315 Fiber Lazer Tezgâhı.....	43
Şekil 3.2.	Kesim yapılan Vento Linear 315 Fiber Lazer Atölye Görüntüsü.....	44
Şekil 3.3.	Kesimde kullanılan N ₂ gazı.....	44
Şekil 3.4.	Tezgâhın kontrol panelinden (a) Kesim profilinin yüklenmesi b) Parametrelerin girilmesi c) Kesim başlangıç referans yüzeyinin belirlenmesi d) Kesim resetleme işlemi.....	45
Şekil 3.5.	Numune parçaların ana levhadan kesilerek çıkartılması.....	46
Şekil 3.6.	Pürüzlülük ölçüm cihazı.....	47
Şekil 3.7.	Projeksiyon cihazı.....	47
Şekil 3.8.	Optik Profilometre Cihazı (Karabük,2022).....	48
Şekil 4.1.	Lazerle kesim işlemi yapılan 1 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	58
Şekil 4.2.	Lazerle kesim işlemi yapılan 2 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	59
Şekil 4.3.	Lazerle kesim işlemi yapılan 3 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	60

Şekil 4.4.	Lazerle kesim işlemi yapılan 4 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	61
Şekil 4.5.	Lazerle kesim işlemi yapılan 5 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	62
Şekil 4.6.	Lazerle kesim işlemi yapılan 6 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	63
Şekil 4.7.	Lazerle kesim işlemi yapılan 7 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	64
Şekil 4.8.	Lazerle kesim işlemi yapılan 8 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	65
Şekil 4.9.	Lazerle kesim işlemi yapılan 9 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	66
Şekil 4.10.	Lazerle kesim işlemi yapılan 10 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	67
Şekil 4.11.	Lazerle kesim işlemi yapılan 11 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	68
Şekil 4.12.	Lazerle kesim işlemi yapılan 12 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	69
Şekil 4.13.	Lazerle kesim işlemi yapılan 13 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	70
Şekil 4.14.	Lazerle kesim işlemi yapılan 14 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	71
Şekil 4.15.	Lazerle kesim işlemi yapılan 15 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	72
Şekil 4.16.	Lazerle kesim işlemi yapılan 16 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası.....	73
Şekil 4.17.	S/N oranına göre hazırlanmış faktör etkilerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi.....	74
Şekil 4.18.	S/N oranına göre hazırlanmış faktör etkilerinin kerf genişliğine etkisinin grafiksel gösterimi.....	75
Şekil 4.19.	Faktörlerin Gri İlişki Etkileşimi Grafiği.....	78
Şekil 4.20.	Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6 (devam).....	80
Şekil 4.20.	Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6 (devam).....	81

Şekil 4.20.	Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6.....	82
Şekil 4.21.	Kesim Yüzeyi Görüntüleri (a) Numune-13, (b) Numune-15 (c) Numune-6.....	82



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Paslanmaz çelik malzemenin özellikleri AISI 304 (DIN EN 1.4301)..	43
Çizelge 3.2. Fiber lazer kesim proses parametreleri ve seviyeleri.....	45
Çizelge 4.1. Tasarım parametreleri deney sonuçları & Etkiler & S/N Oranları.....	74
Çizelge 4.2. Etki oranları & Yüzey pürüzlülüğü ve Kerf genişliği üzerine ANOVA sonuçları.....	77
Çizelge 4.3. Gri ilişki analiz sonuçları.....	78
Çizelge 4.4. ANOVA tarafından elde edilen gri ilişki seviyeleri (GRG) sonuçları..	79

1. GİRİŞ

Yeni ürünlerin tasarım ve optimizasyonu yeni nesil teknolojilerin üretimi ve devreye alınmasında en önemli unsurlardır. Tasarımın doğruluğu, güvenilirliği ve ekonomik olması optimizasyon süreçlerine bağlıdır. Tasarımcının sadece bilgi ve tecrübesine dayalı yapılan imalatlar ile tasarımın minimum ve maksimum ulaşabileceği sınırlar öngörülemede ve Üretim & Kalitesizlik Maliyetleri de güvenlik faktörlerine bağlı olarak ciddi şekilde artmaktadır.

Doğru tasarımı yapılmış mamullerin üretim maliyetlerinin kalite ve güvenlikten ödün vermeden minimum seviyede tutulması, fiyat ve teslim süresini doğrudan etkilemekte olup, özellikle uluslararası pazarlarda rekabet açısından çok büyük önem arz etmektedir. Günümüzde Lazer teknolojisi kullanılan Lazer Kesim Makineleri; Otomotiv, Denizcilik, Havacılık, Ulaşım Sistemleri, Uzay Teknolojileri, Savunma Sanayi, İnşaat, Reklam, Grafik, Ahşap Şekillendirme gibi çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Farklı endüstriyel alanlarda tercih edilen Lazer kesim makineleri, üstün performansı ve istenilen parçaların kolaylıkla, hızlı bir şekilde imal edilebilmesi nedeniyle özellikle sac işleme sektöründe de tercih edilmektedir.

Metal ve metal olmayan malzemeler CAD / CAM programlarıyla kolaylıkla şekillendirilip, kesim proseslerinden hızlı bir şekilde geçirilerek, minimum fireyle istenilen kesim kalitesinde alınabilmektedir. Günden güne hızla gelişen lazer teknolojisi sayesinde inovatif ürünlerin hızlı ve minimum maliyetlerle global pazarlarda tüketicilere ulaştırılabilmesi için geleneksel yöntemlerin aksine daha rekabetçi, işçilik maliyetlerinin, firelerin, zaman kayıplarının minimize edildiği sistemler ön plana çıkmaktadır. Lazer kesim makineleri, ilk yatırım maliyetleri yüksek olmasına rağmen, parçaya temas etmeden malzemeyi kesebilme kabiliyeti, herhangi bir takım kalıp aşınması gerçekleşmemesi, malzemenin yüksek hızlarda kesilebilmesi, esnek ve kullanıcı dostu kullanım kolaylığı, çevre dostu yapısı ve kesim sonrası elde edilen parçalarda ikincil veya üçüncül temizlik işlemlerine ihtiyaç duyulmadan yüzey kalitesi yüksek ürünler elde edilebilmesi nedeniyle endüstrideki uygulamalarda tercih edilmektedir.

İstenilen kalitede ürünler çıkarabilmek için kesim işlemini gerçekleştirmeden önce gerekli işlem parametrelerinin doğru seçilmesi büyük önem arz etmektedir. Aksi takdirde oluşabilecek kalitesizlik maliyetleri, çıkacak hurda miktarındaki artış, gereksiz işçilik, zaman ve maliyet kayıpları ile rekabetçi olmayı güçleştirecektir.

Sanayide imalatı gerçekleştirilen lazer kesim makinelerinde kullanılan ekipmanlardan etkili bir performans elde edebilmek için makine tasarımının doğru yapılması ve kullanılan ekipmanların optimum düzeyde seçilmesi gerekmektedir. Kullanım alanına göre değişken ihtiyaçlara ve taleplere doğru cevap verebilmek için, ihtiyaç duyulan ebat ve toleranslarda hassas işlenmiş en ideal ürünü çıkarabilmesi için Lazer Kesim Makinelerinin de doğru parametrelerle yönetilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda istenilen geometride, talep edilen malzemede doğru parametrelerle kontrol edilen bir cihaz sayesinde, deneme yanılma yöntemi ile kaybedilecek hurda parça ve zamanla birlikte mali kaybın da önüne geçilecektir. Bu da iş-zaman, verimlilik ve performans eğrilerine olumlu yönde etki edecektir.

Bu çalışmada 20 mm kalınlıktaki AISI 304 (DIN EN 1.4301) Paslanmaz çelik levha, 8kW fiber lazer kesim tezgahında farklı kesim parametrelerinin aynı anda kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenerek en uygun tasarım parametrelerinin bulunması hedeflenmiştir. Lazer gücü 8000 W; Değişken parametreler olarak kesme hızı 250 mm/dak, 270 mm/dak, 290 mm/dak, 310 mm/dak; Odak mesafesi ise -11,-12,-13,-14 mm; Frekans 45, 65, 85, 105 Hz; Duty Cycle oranı %50, %60, %70, %80 ve yardımcı gaz basıncı 12 bar olarak belirlenmiştir. Taguchi deney tasarım metodu kullanılarak deney planı oluşturulmuş ve bu tasarıma göre belirlenen parametrelerin ayrı ayrı değiştirilmesi ile kesim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu kesimler sonrası 16 adet, 50 mm x 50 mm deney numunesi elde edilmiştir. Yapılan kesim işleminden sonra elde edilen ölçümlerde her parçanın aynı kesim yüzeyinden ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) belirlenmiştir. Tüm yüzeyin alansal ortalama yüzey pürüzlülüğü (Sa) optik profilometre ile ve kerf genişlikleri de projeksiyon cihazıyla ölçülmüş, seçilen tüm değişkenler değerlendirilerek, Minitab paket programı yardımı ile mamul kesim kalitesini yükseltmek amacıyla aynı anda hem yüzey pürüzlülüğü hem de kerf genişliği değerlerini optimize eden parametrelerin bulunması amaçlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. İmalat Sanayisinde Lazer Kesimin Önemi

- Günümüzde ilerleyen teknoloji ve maliyet avantajı

Dünyada son yıllarda hızla gelişen teknoloji ve artan taleplerin zamanında ve kaliteden ödün vermeden karşılanabilmesi amacıyla imalat süreçlerinin hızlanması da zorunluluk haline gelmiştir. Endüstri 4,0 olarak belirlenen sanayi devrimiyle birlikte; veri analizi, makinelerin birbirleri ile akıllı iletişimi, otomasyonu, üretim proseslerindeki hız, robot teknolojisindeki gelişmeler, bilişim sektöründe hızla gelişen uygulamalar sayesinde daha az maliyetle daha çabuk üretim yapabilen, çok daha az fire veren, yüksek güvenli, iletişimini kablosuz olarak sensörler vasıtasıyla yapabilen makinelerin kullanımıyla hızlı bir teknolojik dönüşüm yaşanmaktadır. Lazer teknolojisi kullanılan makineler de bu inovasyonda çok önemli bir rol oynamaktadır. 1958 yılında ilk defa Makinelerde kullanılmaya başlanan Lazer teknolojisi hızla gelişme göstererek, günümüzde Dünyada ve ülkemizdeki teknolojik gelişmelerde çok önemli görevler üstlenmektedir.

Özellikle metal ve metal dışı malzemelerin istenilen tasarımda ve talebe göre hızlı ve kaliteli kesilebilmesi amacıyla lazer kesim makineleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Hızla gelişen lazer teknolojileri sayesinde geliştirilen lazer kesim makineleri, konvansiyonel sac metal kesme işlemlerinde kullanılan giyotin, plazma, punch gibi makinalardan işleme kalitesi, maliyet ve zaman tasarrufu ile ön plana çıkmaktadır. Geliştirilen lazer teknolojileri sayesinde kesilebilir malzeme kesim kalınlıkları da günden güne artmaktadır. Lazer makineleri, sac işleme sektöründe mamullerin üretim süreçlerinde hızlı, kaliteli, 24 saat üretim esasına göre seri üretimin yapılabilmesi amacıyla çok önemli görevler almaktadır. Lazer kesimle yapılan işlemler sayesinde üretim prosesleri; kalıp, aparat, iş gücü ve insan faktöründen kaynaklanan hatalardan da arındırılmış olur.

- Uygulama alanları

Teknolojik anlamda çok önemli gelişmeler yaşanan lazer teknolojisi sayesinde lazer makineleri, inovatif ürün tasarımı ve çok farklı sektörlerde yenilikçi ürün dizaynlarında çok önemli bir rol almaktadır. Lazer makineleri, özellikle askeri alanda savunma

sanayiinde, elektronik ve bilişim sekt3r3nde, tıp alanında, havacılık ve uzay sistemlerinde, otomotivde, kimya end3strisinde, asans3r ve y3r3yen merdiven imalatında, makine & imalat sekt3r3nde, mimari uygulamalarda, beyaz eşya, end3striyel mutfak ve ekipmanları 3retiminde, medikal 3r3n 3retiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İmalat ve m3hendislik uygulamaları bakımından irdelendiğinde de lazer ışınımı; kesme, delme, kaynak işlemlerinde, metal y3zey temizliği, y3zey sertleştirme, markalama, hassas işleme (Micromachining), pas s3kme ve boya kaldırma gibi farklı uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Lazer kesim makinelerinden, imalat sonrası herhangi kesme sıvısı veya 3evreye zararlı atık maddeler 3retilmediğinden filtrasyon 3niteleri sayesinde de 3evre dostu bir teknolojiye sahiptir.

- Kesilebilen malzeme t3rleri

Metal ve metal dışı malzemeler, y3ksek kesim hızlarında ve kesim kalitesinde lazerle kesilebilmektedir. Cam, kumaş, ahşap, plastik, polimer, seramik gibi malzemelerin kesiminde lazerler kullanılabilir. Al3minyum, hardox, krom, nikel, paslanmaz, pirinç, siyah sac, kompozit gibi malzemeler rahatlıkla kesilebilmektedir.

- Lazeri 3st3n kılan 3zellikler

Sac metal sekt3r3nde kesim prosesi su jeti, giyotin makas, plazma ve lazer gibi farklı y3ntemlerle yapılmaktadır. Lazerle kesim diğer y3ntemlerle kıyaslandığında imalat hızı, minimum fire vermesi ve kullanıcı dostu kolay kullanımı sayesinde tercih sebebi olmaktadır.

Lazer kesim prosesinde parametreler doğru belirlendiğinde hızlı, kaliteli, d3zg3n ve hassas bir kesim elde edilebilmektedir (Berkmanns, 2008).

Lazer kesim sayesinde tam otomasyon yapılarak, minimum 3retim hataları ile 3alışılabilmekte ve CAD programı sayesinde en optimum yerleşimler de yapılarak

kesilecek parçalar set halinde çıkarılabilmektedir. Mekanik olarak ulaşılamayan mikro düzeydeki delik delme, boşaltma ve kanal açma gibi hassas işlemler lazerle kolaylıkla yapılabilmektedir.

2.2. Lazerin Çalışma Prensibi ve Lazerle Kesme İşlemi

2.2.1. Lazerin Anlamı ve Tarihçesi

Lazer kelime anlamı olarak; LASER ‘Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation’ ifadesindeki sözcüklerin ilk harflerinden oluşan, “Uyarılmış Işınım Yayımıyla Işığın Kuvvetlendirilmesi” anlamına gelmektedir.

Lazerin başlangıcı ve insanlığın hizmetine girişi 1917 olarak kabul edilebilir. Albert Einstein tarafından ispatlanan teoriye göre; uyarılmış ışınım kavramını ortaya koyarak lazer ışığının elde edilmesinin önünü açmıştır. Bu teoriye göre uyarılmış enerji düzeyindeki atom alt enerji seviyesine geldiğinde foton yayıp enerji açığa çıkarmaktadır. (Hecht, 1992)

Columbia Üniversitesinden Charles Townes ve arkadaşları marifetiyle 1954 yılında Einstein ‘ın uyarılmış ışınım teorisini temel alarak ilk mikro dalga lazer; MASER- ‘Microwave Amplification by Stimulation Emission of Radiation’ geliştirilmiştir. Mikrodalgaların amonyak kullanımı ile yükseltilmesi sağlanan MASER’in geliştirilmesiyle birlikte lazerin optik alanlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar başlamıştır. MASER, uzay araştırmalarında radyo sinyallerini güçlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Theodore H.Maiman tarafından yakutla çalışan ilk lazer 1960 yılında geliştirilmiş ve ardından P.P. Sorokin ve M.J. Stevenson tarafından da uranyum lazer bulunmuştur. 1961 yılında Ali Javan ve arkadaşları tarafından He-Ne lazeri geliştirilmiştir. 1963 yılına gelindiğinde C. Kumar ve N. Patel tarafından endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan CO₂ lazer geliştirilmiştir. Yine imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan Nd:YAG lazer 1964 yılında Geusic ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Günümüze dek gelişen lazer teknolojileri sayesinde farklı uygulamalarda kullanılabilen çeşitli tipte lazer makineleri üretilmiştir. 1970’li yıllardan itibaren birçok araştırmacı farklı lazer etkisi gösteren malzemeler araştırmaya lazer gücünü artırabilmek ve daha etkili sonuçlar

elde edebilmek için farklı katı-sıvı-gaz formlarında ışıyım ortamları oluşturarak denemelerini gerçekleştirmişlerdir (Özdemir 2012).

Fiber lazerler ise 1990'lı yıllarda iletışim sektörü için geliştirilen amplifikatörlerin bir alt dalı olarak ilerlemiştir. 1995 yılında Oxford merkezli IPG Photonics firması tarafından ilk fiber lazer 1-W fiber lazer adıyla piyasaya sunulmuştur. Geliştirilen yeni teknolojilerle birlikte fiber lazer teknolojisi de hızla gelişerek savunma sanayi, uzay ve havacılık sektörü, tıp, haberleşme, bilişim, medikal sektörü, asansör ve yürüyen merdiven imalatı, gıda ekipmanları üretimi gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır (Steen ve Mazumder 2010).

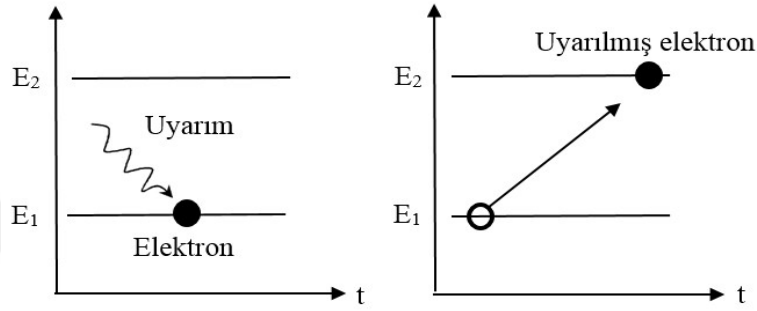
2.2.2. Lazer Işıyımın Üretilmesi

Lazer ışığı, yoğun ve şiddetli, dağılmadan odaklanabilen, monokromatik, tek fazlı, genliği yüksek, tek frekanslı, tek renk paralel dalgalar halinde ilerleyerek yüksek enerji formunda hassas işlemler yapabilme özelliklerine sahiptir (Steen ve Mazumder 2010).

Basitçe ifade etmek istersek; kızdırılarak yüksek sıcaklıklara çıkarılan bir metalin soğuma esnasında ışık yayması olarak betimlenebilir.

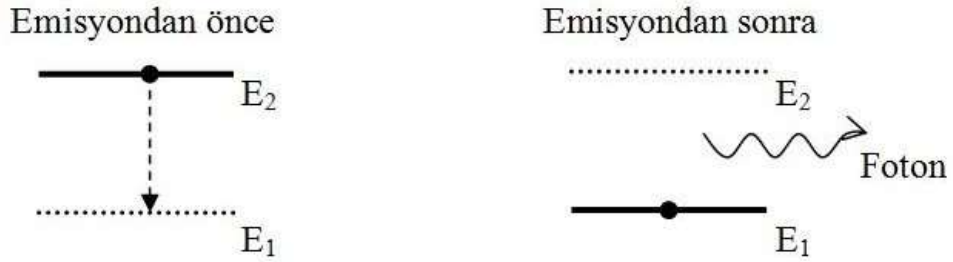
Kainattaki her bir maddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini taşıyan temel yapı taşı olan atomlarda çekirdek ve çevresinde dönen elektron bulutu yer almaktadır. Her atomun farklı iç enerjisi mevcuttur. Atomlar iç enerjisini minimumda tutma eğiliminde olup, bu enerji seviyesine $E1$ taban enerji seviyesi adı verilir ve bu seviyedeki elektron miktarı $N1$ olarak kabul edilsin. $E1$ taban enerji seviyesinden basınç uygulayarak, ısıtarak, elektron bombardımanıyla, ışık demeti yoğunlaştırılması ve hızlandırılmış parçacık bombardımanıyla tahrik edilerek daha üst enerji seviyesi olan $E2$ 'ye çıkarılır. Bu enerji yüküyle yüklenmiş atom, uyarılmış atom olarak sınıflandırılır. Uyarılmış bu atomun elektron sayısı ise $N2$ ile ifade edilir. Enerji seviyesinde olan değişiklik Şekil 2.1 'de

gösterilmiştir. İlk enerji seviyesindeki atomun elektron miktarı ise N_1 ile ifade edilsin. Atom bulunduğu bu taban enerji seviyesinden ısıtma, basınç uygulama, elektron veya hızlandırılmış parçacık bombardımanına maruz tutma ve ışık demeti etkisi uygulama gibi tahrik yöntemleri ile daha yüksek enerji seviyesine (E_2) ulaştırılır. Bu mekanizmalar ile tahrik edilerek enerji seviyesi arttırılan atoma uyarılmış atom denir. Enerji seviyesi artan bu atomdaki elektron sayısı ise N_2 ile ifade edilsin. Enerji seviyesindeki bu artış Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



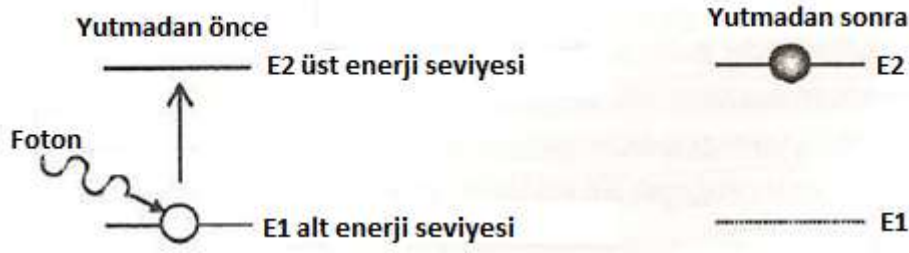
Şekil 2.1. Uyarılmış elektronun enerji seviyesi gösterimi (Tarakçıoğlu, 2004)

E_2 enerji seviyesinde enerjilendirilmiş olan atom 10^{-8} saniyede E_1 temel enerji seviyesine inerek E_2-E_1 arasındaki enerjiyi ortama foton olarak yayar. Bu yayıma kendiliğinden emisyon (spontaneous emission) adı verilir (Şekil 2.2).



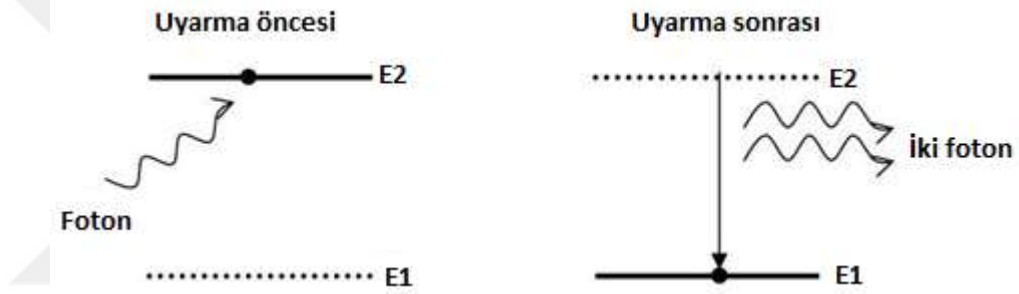
Şekil 2.2. Kendiliğinden emisyon durumu (Tarakçıoğlu, 2004)

Atomlar E_1 seviyesinde kararlı halde bulunurken dışarıdan yapılan bir tahrikle atom fotonun enerjisini yutarak enerji seviyesi E_2 formuna yükselir. Buna tahrik edilmiş yutma ismi verilmektedir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Hareketlendirilmiş yutma durumu (Tarakçıoğlu, 2004)

Harici olarak uyarılarak E2 seviyesine geçen atom kararlı konumuna geçebilmek için enerji farkını foton olarak yayar. Bu sırada atoma aynı frekansta foton çarptırılırsa atom bu fotonla aynı yön, frekans, enerji ve fazda iki foton yayar, bu durum uyarılmış emisyon adını alır (Şekil 2.4).

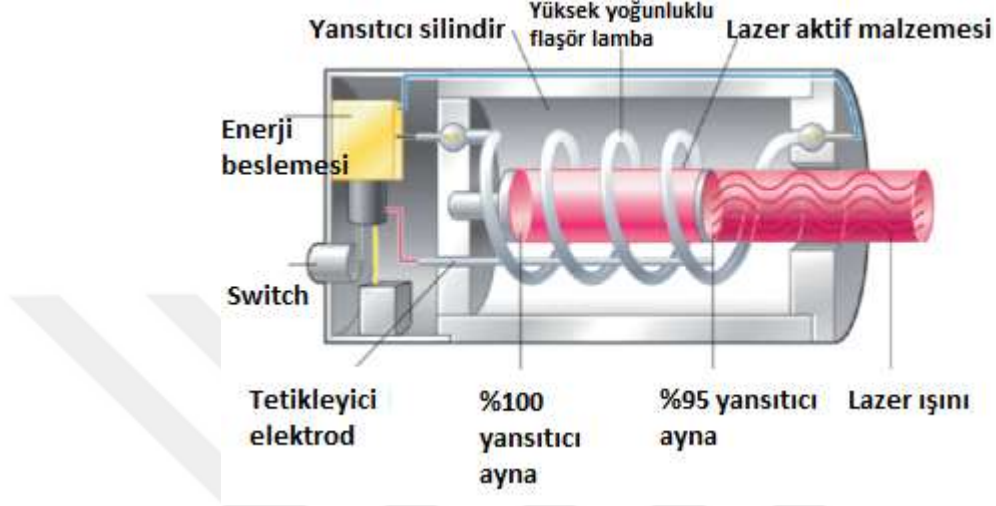


Şekil 2.4. Uyarılmış emisyon durumu (Tarakçıoğlu, 2004)

Uyarım süreklilik arz ederse yüksek enerjiden düşük enerji formuna geçişler sırasında sürekli yayılan fotonların sayısı yükselir. Böylece tek fazda fotonların birleşmesi sonucu güçlü ışın demetleri elde edilir. Tek frekans ve dalga boyunda gerçekleşen bu foton yayını uyarılmış emisyon ve açığa çıkan ışınım da kendiliğinden emisyon adını alır.

Uyarılmış emisyonla birlikte fotonlar birbirine paralel iki yansıtıcı ayna arasında toplanan foton kümesi başlangıç noktasından tek yönde paralel olarak ışın demeti şeklinde yayılır. Lazer ışınıyla büyük bir enerji elde edilmesinin merkezinde sayısız küçük boyutlu enerji kümelerinin dar bir alanda hapsedilerek paralel olarak, aynı yönde ve aynı frekansta güçlü bir şekilde toplanması yer almaktadır. Lazerin devreye alınabilmesi için düşük enerji seviyesindeki atomlardan daha fazla atomun uyarılmış enerji seviyesine getirilebilmesi için optik pompa ünitesi kullanılması gerekmektedir.

Lazer ışınının elde edilmesi için optik bir rezonatör içerisine yerleştirilmiş ışık kaynağı, bu ışığın etkilemesi sonucunda lazer ışını üretecek olan aktif maddeyi içerisinde bulunduran bir aktif ortam ve aktif ortamın bir ucunda tam diğer ucunda ise yarı yansıtıcı aynalar bulunmalıdır. Bu sistem içinde üretilen lazer ışını da optik mercek sistemi üzerinden çıkış yapmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Lazer üretim cihazının (Rezonatör) temel komponentleri (Wikiwand, 2023)

Lazer türüne göre aktif ortam malzemesi değişmektedir. Tahrik yöntemi yarı iletken ve gaz lazerlerde ortam elektrik vasıtasıyla indüklenirken katı ve sıvı tip lazer modellerinde ise optik pompalamayla yapılabilmektedir. Optik pompalama amacıyla yüksek yoğunluklu flaşör lamba rezonatör içine yerleştirilebilmektedir.

Lazer ışının oluşturulduğu ortam yarı iletken veya katı, sıvı, gaz formunda olduğundan lazerler bu aktif olan ortamın türüne göre de adlandırılmaktadır. Örnek olarak ortamda Helyum & Neon gazı kullanılıyorsa He-Ne Lazer, karbondioksit kullanılıyorsa CO₂ Lazer adı verilir. Ortamda kristal kullanıldığında optik ve yansıtma özelliklerini yükseltmek için kristale eklenen dopant madde olan Neodimiyum ve kristal adı; İtiryum-Alüminum-Garnet isimleri bir araya getirilerek Nd:YAG Lazer olarak adlandırılmaktadır.

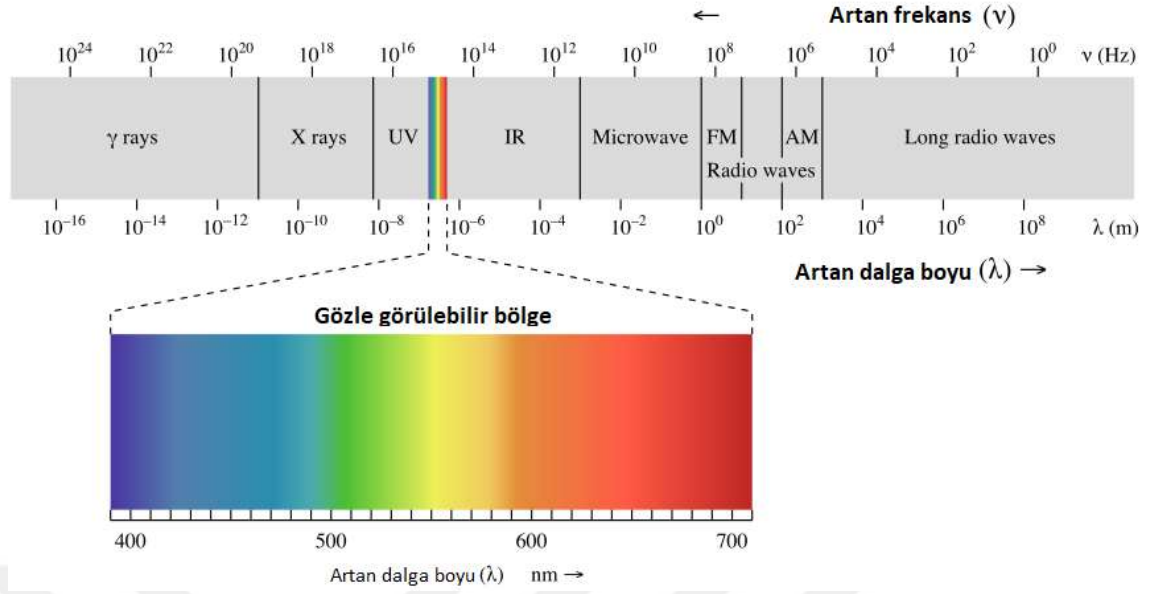
Fotonların oluşturduğu ışın demetinin meydana gelme türüne göre de lazerler tasnif edilebilmektedir. Örneğin lazerler; devamlı ışını üreten Continuous Wave (CW) sürekli dalga modunda veya kesikli periyodik atımlı (pulse) darbeli modda lazerler olarak sınıflandırılabilir.

2.2.3. Lazer Işınının Karakteristik Özellikleri

Lazer ışını bant genişliği, yönlendirilebilir olması, uyumlu, frekans ve şiddetiyle ilgili avantajlarıyla standart geleneksel ışınlarla göre daha üstündür. Mesela ampulün içindeki volframdan yapılan tel, elektrikle uyarıldıktan sonra fotonu ortama serbest bırakmakta ve ilk konumuna tekrar geri dönmektedir. Tekrar uyarım gerçekleşene kadar beklemede kalmaktadır. Bekleme sırasında atomlar foton yaymayı devam ettirdiğinde düzensiz bir foton yığını elde edilir ve doğru güçlü bir ışın demeti olarak yönlendirilmediğinden Wolfram telinin etrafındaki şekle bağlı belirli bir bölgede kümelenirler. Işınlardan geniş bir hacimde uzun süre dağınık durması nedeniyle güç yoğunluğu çok düşük olmakta ve verimsiz bir ışın elde edilmektedir (Soydan, 2015).

Fotonlar tek, paralel ve yüksek genlik faktörleri sayesinde çok yüksek sayıda foton yansıtıcılar sayesinde yönlendirildiği dar alanda çok yüksek güçte etki gösterebilir. Çok küçük çapa odaklanabilen güçlü lazer ışını sayesinde nominal güç seviyesinden daha fazla güçlere erişebilmektedir. Örneğin $100\text{W}/\text{cm}^2$ güçteki lazer ışını, ışın çapı $0,40\text{ mm}$ 'ye düşürülerek $110\text{ W}/\text{cm}^2$ güç yoğunluklarına çıkabilmektedir (Patel, 2020).

Standart ışık, farklı faz ve frekansta değişen dalga boylarında oluşurken lazer ışını tek renkli yani monokromatik olup, çok düşük dalga boylarında dar bir alanda oluştuğundan özellikle kızılötesi alan içinde yer almaktadır. 1×10^{12} hertz ile 3×10^{15} hertz arasında değişen optik frekans alanında yer alan lazer ışını kızılötesi ışınların, görülebilen ışın ve morötesi ışınların bulunduğu alanda yer almaktadır. Yani lazer ışınları çok yüksek frekanslarda çalışabilmektedir (Şekil 2.6).



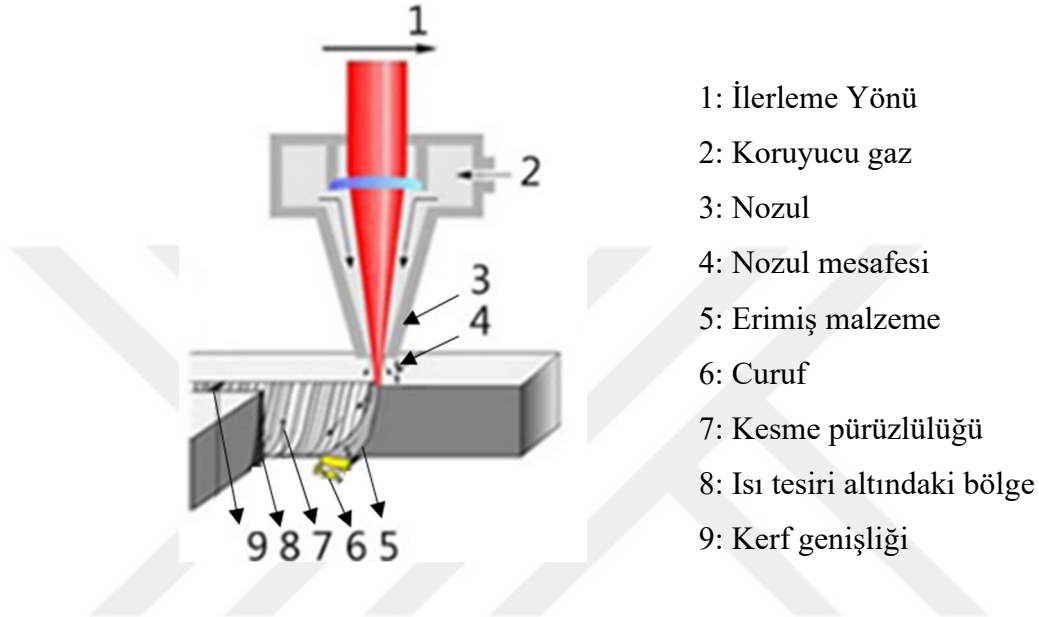
Şekil 2.6. Elektromanyetik ışık dağılımı (Tayf) (Anonim, 2023)

Ultraviyole lazerler ultraviyole (UV) ışık bölgesinde 355 nm dalga boyunda, Fiber lazerler kızılötesi alanda 1070 nm dalga boyunda, CO₂ lazerler 10604 nm gibi yüksek dalga boylarında, Nd:YAG tipte lazerler ise 1,06 μ m kızıl ötesi bölgede hizmet vermektedir. Arsenit-Galyum-Aluminyum lazeri 0,85 μ m, Ruby yakut lazeri 0,6943 μ m olan kırmızı dalga boyu alanında, He-Ne lazer 0,6328 μ m dalga boyunda turuncu bölgede, Argon lazer ise mavi yeşil renk alanında çalışmaktadır.

Geleneksel ışınların yansıtılıp, toplanmasında mercek ve aynalar yeterli iken elektromanyetik dalga ile optik eksene paralel olarak güçlendirildiği ve dar bir bant genişliğinde demet haline getirildiği için daha yüksek güçlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çıkan lazer ışını kaynaktan uzaklaştıkça ıraksama eğilimi gösterse de bu kilometrede ortalama 100 mm seviyesindedir. Dolayısıyla doğru odaklanmış bir lazer ışınının çok yüksek güç yoğunluğunda olduğu ifade edilebilir. Lazer ışınında dik kesitte elektrik alanında faz kayması meydana gelmemektedir. Oluşan ışın demetinde açısız sapma çok düşük seviyelerde olduğundan konum olarak faz uyumlu olarak çalışmaktadır. Böylelikle ışın demeti, çok küçük noktalara odaklanarak yüksek güç yoğunlukları elde edilmesiyle kesme, delme, kaynak gibi endüstriyel proseslerde verimli bir şekilde kullanılabilir.

2.2.4. Lazerle Kesme İşlemi

Lazer ışını ile yapılacak imalat işlemlerinde ışının malzeme yüzeyinde soğurulması ile oluşan ısı kullanıldığı için kullanılan lazer ışınının ve malzemenin özellikleri oldukça önemlidir. Lazer ışınının yoğunluğuna ve malzeme yüzeyinde soğurulma oranına bağlı olarak malzemede ısınma, ergime ve buharlaşma olayları görülür.



Şekil 2.7. Lazer kesim yöntemi (Wandera, 2011)

Lazer kesim, enerji kaynağı olarak kullanılan lazer ışını metal yüzeyin kesim alanına odaklayarak meydana getirilir. Kesim başlangıcında malzemede meydana getirilen buharlaşma ve delik oluşumu, odaklanan bu ışının ürettiği ısı sayesinde gerçekleşmektedir. Daha sonra Şekil 2.7 'de gösterildiği gibi lazer ışını hareket ettirilerek metal eritilmekte ve kesilen malzemeler yardımcı gaz ile parçadan uzaklaştırılmaktadır (Liu ve diğerleri, 2022).

Lazer ışını mercekler sayesinde küçük bir alana odaklanarak, ısıdan etkilenen dar bir bölge (ITAB) oluşturarak malzeme kaybı da en aza indirgenmektedir (Ullah ve diğerleri, 2022).

Lazerle kesme yönteminde bilgisayar destekli tasarım ve programlama yapılması sayesinde kısa sürede, çok farklı ve karmaşık parçaların kesilmesi mümkündür. Lazer kesim işlemi için program yazmak oldukça kolay ve hızlı bir metottur. Böylece farklı

parçalar arasında geçiş yaparak, etkili bir stok yönetimi ve zaman tasarrufu da sağlanabilmektedir. Sadece malzemeye uygun lazer makinesi seçmek, kaliteli kesim yapmayı tek başına sağlayamamaktadır. Özellikle kesim parametrelerinin doğru belirlenmesi, kesim işleminin de en az termal hasarla yapılabilmesi açısından önem arz etmektedir (Stournaras vd., 2009).

Lazerle kesim yönteminin diğer kesim yöntemlerinden farkı; kesim kalitesinin yüksek olması, kesim genişliklerinin ve ısıdan etkilenen bölgenin daha dar ve kesim yüzeylerinin görece pürüzsüz olmasıdır. Bu özellikleriyle lazerle kesim işlemi geleneksel kesim yöntemlerinden daha üstün olmaktadır (Patel vd., 2011).

Lazer kesimin başlıca avantajları; hassasiyet, otomasyon, yüksek hız, tekrarlanabilirlik, yüksek kalite, uygun maliyet ve temassız kesim olanaklarıdır (Shamlooei ve diğerleri, 2022).

2.3. Lazer Türleri

Lazerler, sınıflandırılırken ışının üretilmiş olduğu ortama göre adlandırılmaktadır. Temelde dört farklı grupta lazerleri sınıflandırabiliriz: katı, sıvı, gaz ve yarı iletken modeller.

Katı lazerler; iyonların iletim elemanı olarak kullanıldığı aktif ortamda katı halde nadir bulunan (Yb, Er, Nd, vb.) elementlerin kullanıldığı (Ti, Cr) gibi geçiş metallerin yer aldığı lazerlerdir. Ayrıca LiSAF, YAG, YLiF₄, Al₂O₃ kristalleri ve P₂O₅, SiO₂ bileşikler de bu lazerlerin aktif ortamında kullanılabilmektedir. Katılarda atomların yoğun dizilişli olması sayesinde ışının çıkış yoğunluğu da yüksek olmaktadır. Katı hal lazerleri kısa dalga boyunda ve yoğun titreşimli çalışabildiğinden özellikle yansıtıcı yüzeyli malzemelerde etkili bir işletim performansı gösterebilmektedir.

Sıvı lazerler, aktif madde olarak istenilen hacimde yapılan bölmeye konulan aktif madde sayesinde yüksek güçlere ulaşabilmektedir. Optik pompalamayla tahrik edilen sıvı sayesinde artan enerji seviyesi ile birlikte foton üretimi sağlanır ve aynalarla yansıtılan

fotonlar güçlü bir ışın demeti haline dönüştürülerek belli bir seviyeyi geçtikten sonra ayarlanabilir yarı yansıtıcı aynadan geçirilerek lazer ışını üretilir. Sıvı lazerler kimyasal analiz işlemlerinde etkili olarak kullanılabilir.

Gaz lazerler, aktif ortamında gaz karışımı olan ve gazlardan birinin diğerine çarptırılması ile uyarımın gerçekleştirildiği lazerlerdir. Helyum neon lazerleri düşük güçte çalışmaktadır. Aktif ortamında argon gazı bulunan İyon lazerleri de gaz lazerleri sınıfında değerlendirilmektedir. Yaygın olarak kullanılan CO₂ lazerlerinde gaz karışımı helyum, azot ve CO₂ den oluşmakta olup, N₂ molekülleri kullanılarak CO₂ molekülleri tahrik edilerek titreşim geçişlerinden etkili olarak istifade edilmektedir.

Yarı iletken lazerler, farklı iki yarı iletken (semi-conductor) malzemenin arasından kuvvetli bir elektrik akımı geçirilerek ışınımın gerçekleştirildiği nispeten düşük çıkış güçleri elde edilmesine rağmen özellikle bilişim, ölçme ve iletişim sektörlerinde fiyat ve boyut avantajı sayesinde tercih edilmektedir.

Endüstriyel uygulamalarda aşağıda verilen lazer makineleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.3.1. Nd:YAG Lazerler

Aktif maddesi “Neodymium Doped Ytrium Aluminium Garnet” kristali olan katı lazerler sınıfında bulunan %5’ten düşük verim seviyelerinde çalışılabilmektedir. Enerji pompalanarak verim %5 seviyelerine çıkabilmektedir. 1,06 µm sürekli dalga boyunda maksimum güç 4 kW olurken, darbeli atımlar sayesinde çıkış gücü 10 kW’ a gelmektedir. Verim olarak CO₂ lazerlerden düşük olsa da kısa dalga boyu sayesinde daha dar bir alana odaklanabilmeleri sayesinde metal yüzeylerde daha az yansımayla işlem yapılabilmektedir.

2.3.2. CO₂ Lazerler

Aktif ortamında He, N₂ ve CO₂ gazları bulunan 10,6 µm dalga boyunda %5-10 verimde çalışan bu lazerler sanayide genel olarak 15 kW çıkış güçlerinde kullanılmaktadır.

2.3.3. Disk Lazerler

Aktif ortamı meydana getiren Yb:YAG maddesi çubuk yerine disk formunda olup, uyarımın diyot pompası ile yapıldığı yüksek güçlü lazerlerdir. Nd: YAG lazerlere göre daha kısa dalga boylarında çalışmakta olup, %50 verim seviyelerinde 16 kW çıkış güçlerinde kullanılmaktadır (Çavuşoğlu, 2011).

2.3.4. Fiber Lazerler

Fiber lazer rezonatörü veya üretici adı verilen bir sistemle lazer ışını üretimi gerçekleştirilir. Fiber lazerlerde ışın diyotlarda oluşturulup, rezonatörde birleştirilerek yüksek yoğunluklu ışın demeti halinde fiber optik kablolar ile fiber hızında kesme kafasına taşınarak paslanmaz kesimleri için N₂ veya DKP, HRP, siyah sac kesimleri için O₂ yardımcı gazıyla birlikte kesim gerçekleştiren lazer makinalarıdır.

Aktif ortamında iterbiyum ve erbiyum maddeleri bulunan 1,07 µm dalga boyunda çalışan bu lazerler CO₂ ve Nd:YAG lazerlere göre oldukça verimli çalışmaktadır. Çok dar odak çaplarında, ışını mükemmel olarak doğrusal bir şekilde yoğunlaştırarak kalın malzemelerin kesiminde bile yüksek performans elde edilebilmektedir. Verim seviyesi %30 olabilmektedir. Aynı çalışma şartlarında CO₂ lazerin üç katı performansta malzemeyi %50 daha az enerji sarfıyatı ile işleyebilmektedir. Fiber lazerler uzun süre bakım gerektirmeden hizmet verebilmektedir. Alüminyum, pirinç, bakır gibi metaller herhangi bir yansıma olmadan fiber lazerle rahatça kesilebilmektedir (Kellens vd., 2014).

Lazer kesim işlemi için endüstride yaygın olarak Nd:YAG, karbondioksit (CO₂) ve fiber lazerler kullanılmaktadır (Lopez ve diğerleri, 2017). Fiber lazerler yaygınlaşmadan önce CO₂ lazerler kalın malzemeleri kesmede daha avantajlıyken, Nd:YAG lazerler hassas

kesim gerektiren ince malzemelerde kullanılıyordu. Ancak yüksek gücü, yüksek ışın kalitesi ve 1060-1080 µm dalga boylarında çalışan fiber lazerler üstün özellikleri sayesinde, diğer lazerlere göre daha fazla tercih edilmektedir (Tamura vd., 2016).

Araştırmacılar, fiber lazer ve CO₂ lazer arasındaki yüzey kalitesini karşılaştırmak için 10 mm kalınlığında paslanmaz çelik levhalar kullanmışlar ve fiber lazerlerin CO₂ lazerlerden çok daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir (Stelzer, 2013). Paslanmaz çeliklerin kesimi için yardımcı gaz olarak N₂ kullanımıyla fiber lazerlerin, CO₂ lazerlere göre çok daha verimli olduğu ortaya konulmuştur (Fomin ve diğerleri, 2015).

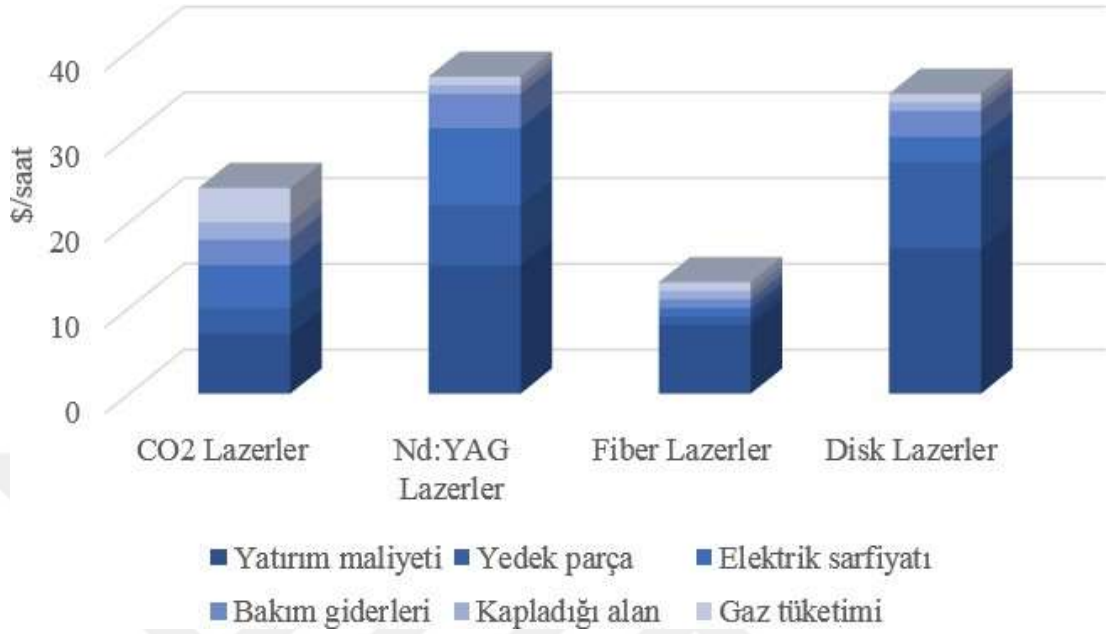
İmalat proseslerinden yüzey işleme ve malzemenin kesim metotları olarak değerlendirildiğinde dört farklı lazer türünün çoklu performansının karşılaştırmalı hali Şekil 2.8’de verilmiştir. Görüldüğü üzere Fiber lazerler diğer lazerlere göre üstün kalitede hizmet verebilmektedir.

	Bakım	Çevresel Etki	Dalga Boyu	Güç	Işın Kalitesi	Maliyet
Nd:YAG lazer (lamba pompalı)	★	★	★★	★	★	★
Nd:YAG lazer (diyet pompalı)	★	★★	★★	★	★	★
CO ₂ lazer	★★★	★	★★	★★★	★★★	★★★
Disk lazer	★	★★★★	★★	★	★★★	★★
Fiber lazer	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★

Şekil 2.8. Endüstriyel lazer türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması (Shiner 2012)

Sanayide yaygın olarak kullanılan farklı tür lazerin aynı çalışma şartlarında 5 yıllık periyotta 3 kW lazer gücünde çalıştığı esas alındığında işletim maliyeti kıyaslandığında bakım, enerji ve sarf malzeme giderleri baz alındığında parça başı en düşük maliyetin Fiber lazerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 2.9). Fiber lazerlerin, farklı sektörlerde

uygulama alanlarındaki üstün özellikleri sayesinde ilerleyen dönemlerde pazar payının önemli ölçüde artacağı hedeflenmektedir.



Şekil 2.9. Farklı tür lazerin işletim maliyetlerinin kıyaslanması (Assuncao vd., 2010)

2021 yıl sonu itibarıyla dünyada 17,48 milyar USD olarak gerçekleşen lazer makineleri pazarı, 2022-2030 yılları arasında %9,1 büyüme hedefiyle endüstriyel uygulamalarda çok önemli gelişmelerin ve inovasyonun yaşanacağı bir alan olacağı aşıkardır (Grandview, 2023).

2021 yılında 115,000 adet lazer ünite satış rakamıyla fiber lazerlerde 3,1 milyar USD/yıl satış cirosu gerçekleşmiştir. Fiber lazer pazarında 2030 yılına kadar %11,1 büyüme hedefiyle pazar payının artması hedeflenmektedir (Future Market, 2023).

Literatürde yapılan çalışmalar irdelendiğinde gelişen lazer teknolojisi ile endüstriyel kullanımlarda lazerin kullanım potansiyelinin giderek arttığı ve yenilikçi tasarım ve uygulamalarda özellikle yaygınlaştığı görülmektedir. Farklı ışın türlerine göre rekabetçi ve üstün özelliklere haiz lazer ışınyla imalat süreçlerinde büyük işçilik ve maliyet avantajı elde edilmektedir. Fiber lazerlerin enerji, bakım, yedek parça, işçilik, zaman ve işletme giderleri açısından değerlendirildiğinde pazar taleplerine bağlı olarak sanayideki kullanım oranlarının giderek arttığı görülmektedir.

2.4. Fiber Lazer Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

Fiber lazerlerde, malzemeye lazerin gücü daha etkili aktarılabilmekte, uzun odaklı lensler kullanılabilmekte, optik lensler daha az hasara uğramakta ve uzun mesafeli uygulamalarda da kullanılabilmektedir. Elde edilen lazer ışını fiber optik kablo ile iletildiğinden güç kaybı yaşanmaz ve kesme kafasında çok yüksek ısılarla ulaşılmadığından ekstra soğutma sistemlerine de ihtiyaç duyulmamaktadır. Böylelikle fiber lazerlerde yüksek enerji verimi elde edilmiş olur. Fiber lazerlerde, aynı kalınlığa sahip çelik malzeme diğer lazer türlerine göre daha düşük güçlerde ve enerji tüketim değerlerinde kesilebilir. Yüksek güçlü bir fiber lazer kesici, geleneksel bir CO₂ lazerden 5 kata kadar daha hızlı kesim yapabilir ve işletme maliyetlerinin yarısını kullanır (Scintilla ve diğerleri, 2013). Ayrıca 2 kW fiber lazer ışını ile 4 kW CO₂ lazer ışını karşılaştırıldığında, fiber lazer yaklaşık 5 kat daha fazla güç yoğunluğuna sahiptir. Ayrıca daha kısa dalga boyu nedeniyle fiber lazer 2 kat daha fazla absorpsiyon özelliğine sahiptir (Arteaga, 2022). Ayrıca 3 kW fiber lazer 1 mm kalınlığındaki paslanmaz çeliği yaklaşık 30 m/dak hızla kesebilirken, 5 kW CO₂ lazer kesim makinesi bu hızın ancak üçte birine ulaşabilmektedir (Powell ve Kaplan, 2012).

Fiber lazer farklı uygulama alanlarında üstün kalitede hassas kesimler yapabildiği için imalat sektöründe büyük avantajlar sunmaktadır. Fiber lazer kesim aşağıdaki avantajları sunmaktadır:

- Çevreye atık gaz salınımı veya kesme sıvısı gibi atık maddeler salmadığı için tam çevre dostu bir uygulamadır.
- Yüksek kesim hızı, düşük seviyede distorsiyon ve parçada dar bir alanda ısı nüfuziyeti sunduğundan geleneksel kesim yöntemlerine göre işlenmesi daha zor olan malzemelerde dahi yüksek performans sağlamaktadır.
- İlave ikincil veya üçüncül proses ve işçilik maliyeti olmadan malzemenin istenilen profilde kesilmesine olanak sağlamaktadır.
- Otomasyonla kolayca yönetilebilme imkanına sahiptir.
- Üretilen ışının fiber optik kablolarla fiber hızında aktarımı sağlandığından enerji verimi ve takım kesim gücü çok yüksektir.

- Işının kesilen parçaya teması olmadığından kesim profilleri arasındaki geçişler çok hızlı olabilmekte ve seri kesim sırasında büyük zaman tasarrufu sağlanabilmektedir.
- Lazer ışını ve iş parçası arasında temas yüzeyi olmadığından malzemede atıklık veya olumsuz alaşımınma durumu söz konusu olmamaktadır.
- Işınlardan manyetik alandan etkilenmeden, vakum veya X ışını korumasına ihtiyaç duymadan kesim prosesini tamamlayabilmektedir.
- Işın fiber kablolar üzerinden aktığı için çok hızlı bir şekilde zor alanlarda bile yüksek performans sunabilmektedir.
- Farklı geometrilerdeki ve değişken kalınlıktaki malzemeler herhangi bir kalıp maliyeti olmaksızın hızlı bir şekilde aynı tezgâhta kesilebilmektedir.
- CAD/CAM programları ile istenilen tasarımdaki ürünler minimum hata oranları ile elde edilerek, hurda maliyetleri minimize edilebilmektedir.
- Kesim yüzey pürüzlülüğü çok düşük olduğundan, çapaksız bir yüzey elde edilmekte, dolayısıyla kesim sonrası ilave bir prosese ihtiyaç duyulmamaktadır.
- Metal dışı, sünek, kırılabilir veya çok sert malzeme türlerinin kesilmesi mümkün olabilmektedir (Metiner, 1995).

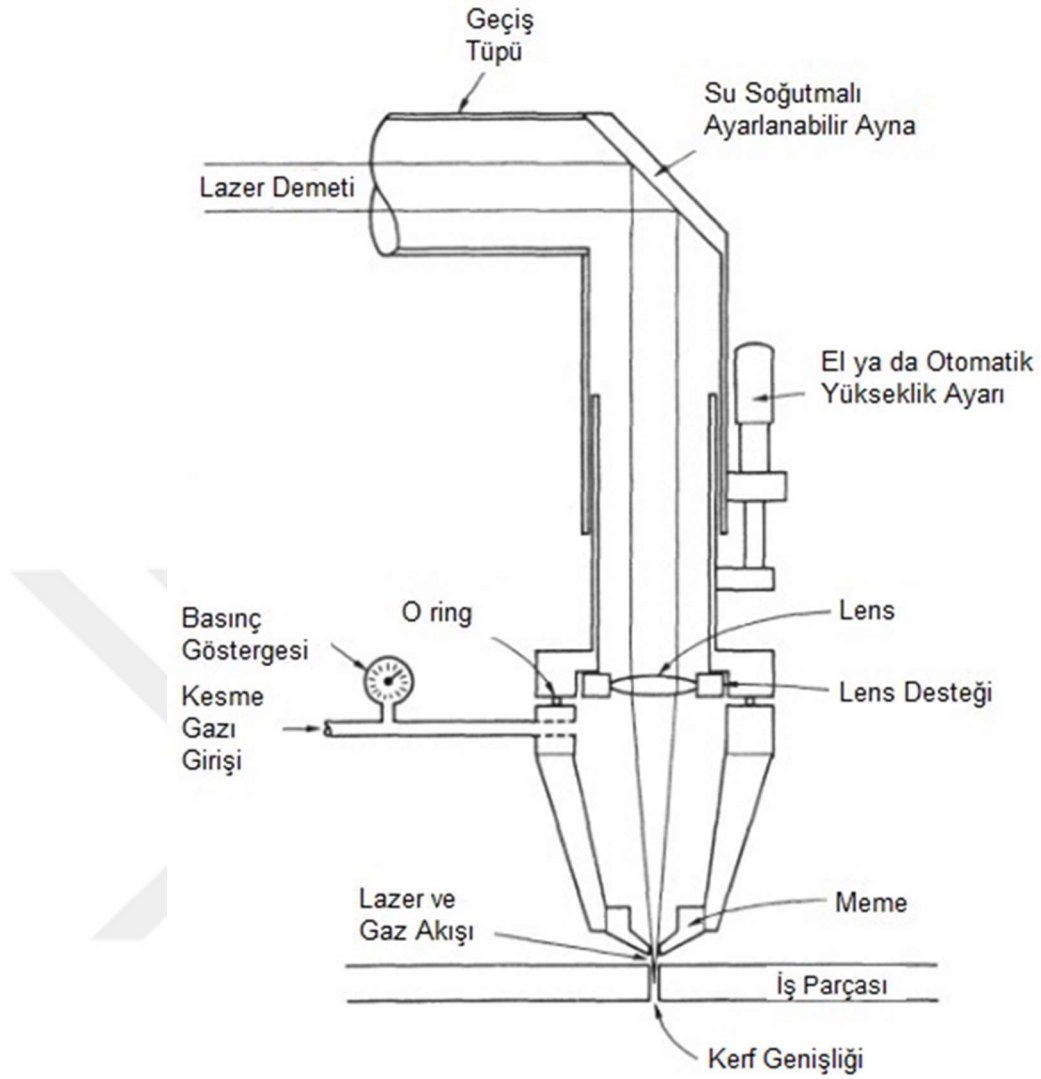
Fiber lazer tezgahların bazı dezavantajlarından da bahsetmek gerekirse;

- Lazer kesim tezgahının ilk kurulum maliyeti yüksektir.
- Arıza durumunda yedek parça maliyetleri yüksektir.
- Makineyi efektif kullanabilen kalifiye personel istihdamı gerekmektedir.
- İmalat prosesinin detaylı olarak planlanıp, doğru uygulanması gerekmektedir.
- Kullanırken geleneksel tezgahlara göre daha fazla özen, dikkat, iş güvenliği prosedürlerine ve bakım prosedürlerine mutlak uyum gerektirir.
- Kesim hızı yüksek kaliteli ekipmanların kullanımı gereklidir.
- Periyodik bakımların mutlaka uzman yetkili personel tarafından özenle yapılması gerekmektedir.

2.5. Lazer Kesim Kalitesi

Kesilen numunenin yüzey pürüzlülüğü, morfolojisi, geometrisi ve metalurjik özellikleri gerçekleştirilen lazer kesimin kalitesini belirlemektedir. İstenilen kalite düzeyi, kesilecek malzemeye göre belirlenen parametrelere göre değişmektedir. Gerçekleştirilen çalışmalarda ilerleme hızının, lazer modunun, lazer gücünün, odak uzaklığının, gaz basıncının ve yardımcı gaz tipinin kesim kalitesini etkileyen en önemli parametreler olduğu gösterilmiştir (Patel ve Bhavsar, 2020). Lazer kesim işleminde tercih edilen yüksek üretim hızlarında kaliteli kesim yüzeyleri elde etmek için optimum işlem parametreleri kombinasyonunun seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü ürünlerin kesim sonrası; yüzey pürüzlülüğü, çentik genişliği, sertliği ve parçanın işlenme hızı gibi temel özellikleri bu parametrelerle doğrudan ilişkilidir (Ding, 2020).

Kaliteli bir lazer kesim yapabilmek için eritilerek çıkartılan malzeme miktarının ve kesim işlemi gerçekleştirilen bölgenin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir (Şekil 2.10). Kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve ısı tesiri altındaki bölge kesim kalitesini belirlemek için irdelenmesi gereken karakteristik değerlerdir.



Şekil 2.10. Lazer Kesimin Şematik Diyagramı (Webb, 2004)

Lazer kesim işleminin kalitesi incelenirken aşağıdaki hususlara dikkat etmek gerekir.

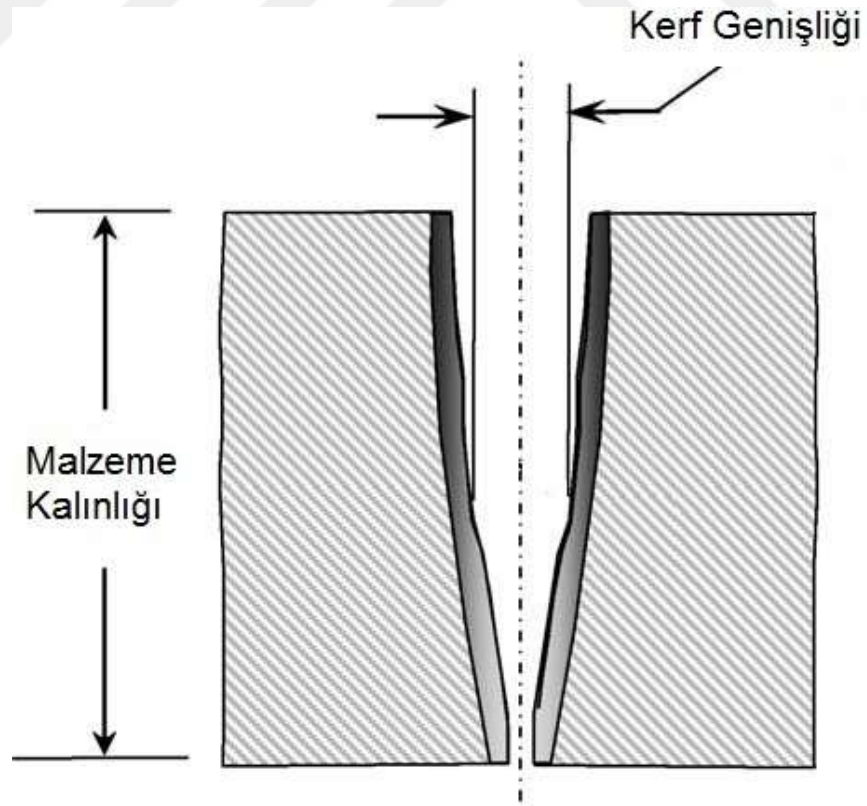
- Kesim işlemi sonrasında meydana gelen kerf genişliği (kesme boşluğu) diğer proseslerle kıyaslandığında daha dar olduğu için büyük ölçüde malzeme kaybindan tasarruf edilmektedir.
- Kesim yapılan yüzeylerdeki kenarlar daha keskin kenarlı olmaktadır.
- Kesim sonrası çıkan yüzeyler daha pürüzsüz ve çapaksız olduğundan ilave temizlik işlemine gerek duyulmaz.
- Isı etkisi altındaki bölge (ITAB) daha dar alanda tutulduğundan ısı etkisi sonrası tekrar katılma gösteren bölgede oluşabilecek bozulmalar önemsizdir (Steen ve Mazumder, 2010).

Yapılan kesim işleminde aşağıdaki hususlara dikkat etmek gerekir;

- Temassız bir kesim yapıldığından lazer kesme ekipmanlarında herhangi bir aşınma olmaz, fakat yansıtıcı lenslerin özellikle temiz tutulması önemlidir.
- Her yönden kesim işlemine başlanabilir.
- Kesim programı istenilen değişikliklere açık olduğundan kesim prosesi oldukça esnek olmaktadır (Steen ve Mazumder, 2010).

2.5.1. Kerf genişliği

Kerf genişliği, lazer kesim sırasında meydana gelen açıklığın genişliğini ifade etmektedir. Kesilen iş parçasının üst yüzeyindeki boşluk alt yüzeyine göre daha geniştir (Şekil 2.11). Kerf genişliği kesilen ana parçadan çıkartılan malzemeyi gösterir, dolayısıyla her zaman daha dar kerf genişliklerinin elde edilmesi istenmektedir. Kerf genişliği üzerinde kesim hızı, lazer gücü, koruyucu gaz ve odak mesafesi en önemli değişkenlerdir (Wandera vd., 2011).



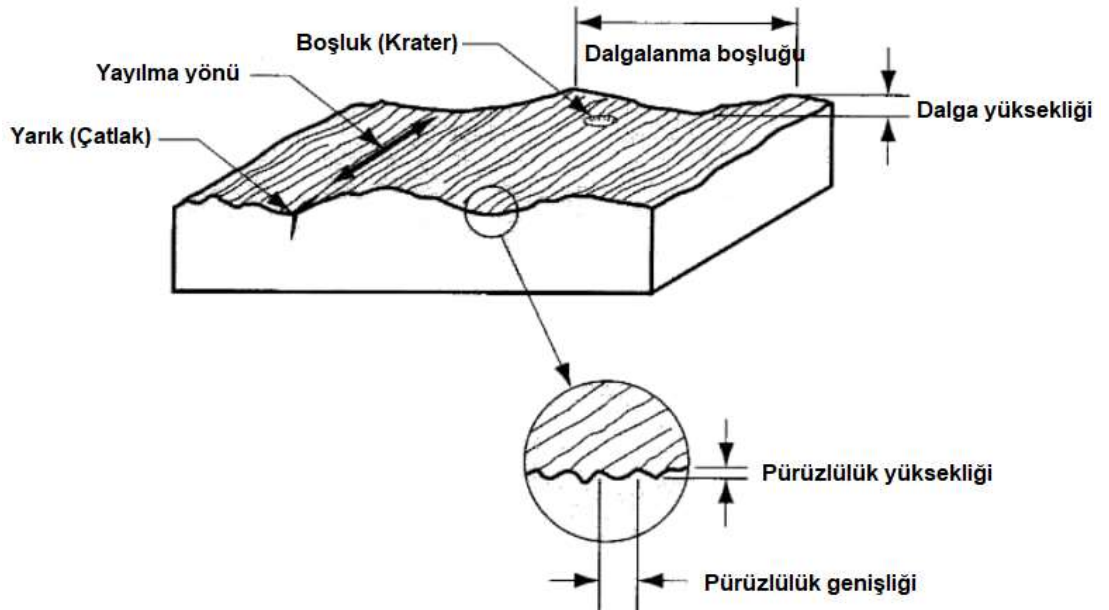
Şekil 2.11. Kerf genişliğinin şematik gösterimi (Stournaras, 2009)

2.5.2. Yüzey pürüzlülüğü

Lazer kesim sonrası kesilen parçanın kesim yüzeyinde düzensizlikler oluşmaktadır. Lazer kesim işlemi sırasında meydana gelen yarı dairesel ve dairesel izler, kesim hızına, yapılan kesimin nasıl oluştuğuna ve lazer ışının formuna bağlı olarak değişmektedir. Lazerin kesim kalitesi kesim sonrası oluşan yüzeyin durumuna bakılarak yorumlanabilir. Kesim yapılan yüzey dikkatlice incelendiğinde lazer ışının kesilen parçaya üst yüzeyden giriş yaptığı ve alt yüzeyden de çıkış yaptığı görülür. Işının giriş yaptığı üst kısımda daha homojen ve düzenli izlerin aralarında 0,1..0,2 mm aralıklı olacak şekilde dağıldığı gözlenirken, alt yüzeyde ise ergiyen metal atıklarının ve daha bozuk kaba bir yüzey formunun oluştuğu görülmektedir (Radovanovic ve Dasic, 2006).

Lazer kesim işleminde kesilen parçanın kesim yüzeyleri oluklu bir yapıdadır. Düşük kesim hızlarında, meydana gelen oluklar lazer ışınına paralel şekilde meydana gelir.

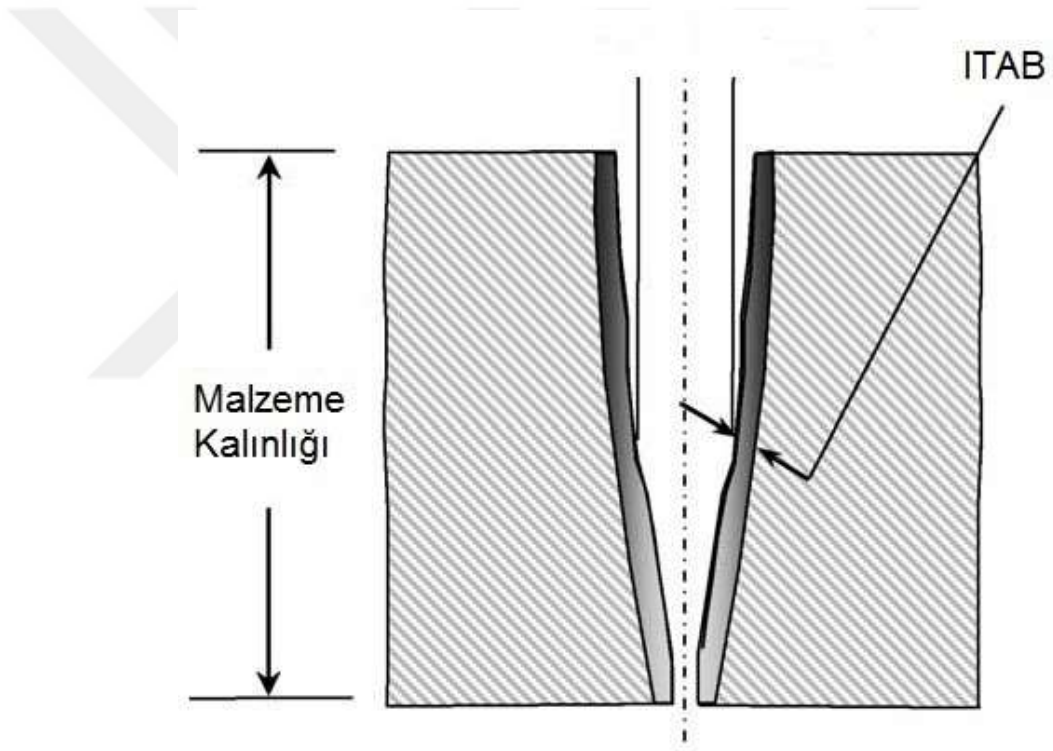
Lazerin kesim hızı arttırıldıkça olukların yüzeyden uzaklaştığı gözlenir. Rz Maksimum pürüzlülük ve Ra ortalama pürüzlülük değerleri ile yüzey pürüzlülüğü belirlenir. Kaliteli bir kesim elde edebilmek için düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin elde edilmesi beklenmektedir (Radovanovic ve Dasic, 2006).



Şekil 2.12. Yüzey Pürüzlülüğü (Leadrp, 2023)

2.5.3. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB)

Lazer kesim sırasında kesilen kenarın yan tarafı ısıdan etkilenen bölge olarak karşımıza çıkar (Şekil 2.13). Bu bölgede malzemenin metalurjik olarak iç yapısının ısı etkisine maruz kaldığı ancak ergime işleminin gerçekleşmediği görülür. Isıdan etkilenen bölgedeki malzemenin iç yapısındaki değişiklikler lazer kesim kalitesinin belirlenmesinin spesifik özelliklerindendir. Isıdan etkilenen alanın genişliği kesim uzunluğu başına düşen enerji ve kesimi yapılan malzemenin kalınlığı ile bağlantılı olarak değişmektedir. Eğer kesim, ısıнын etkisinin özellikle çok önemli olduğu bölgelerde yapılırsa ITAB genişliği büyük önem arz etmektedir (Wandera vd., 2011).



Şekil 2.13. ITAB şematik gösterimi (Stournaras, 2009)

2.5.4. Kesme Gazları

Lazer kesim sırasında lazer kesim gazlarının önemli görevleri vardır.

- N_2 gibi asal gazlar kesim esnasında meydana gelen eriyen metalin soğuyup katılaşmadan alt yüzeyden atılmasını sağlamaktadır.
- O_2 gibi aktif gazlar ise işlem gören parça ile kimyasal olarak tepkimeye girer.

- Aktif gazlar aynı zamanda ince malzemelerin kesilmesi esnasında yüksek yoğunlukta ışın sayesinde plazma oluşumunu engeller.
- Gazın üflenmesi sayesinde optik parçalar sıcak metalin sıçramasından korunmuş olur.
- Kesilen kenarlarda üflenmiş gaz sayesinde soğutma işlemi yapılarak ısı etkisi altındaki bölgenin dar tutulması sağlanır.

Kesilen malzemenin kalınlığı arttıkça kesim gazları önem arz etmektedir. Özellikle 10 mm ve üzeri kalınlıktaki malzemelerin yardımcı kesim gazları olmadan yüksek hızlarda kesiminin yapılması mümkün değildir (Ion vd., 2005).

Paslanmaz çelik, nikel, pirinç gibi metalleri üstün kalitede kesebilmek için uygun maliyetli olan asal gazlardan N_2 gazı kullanılmaktadır (Şekil 2.14).

Çok kırılğan ve yüksek mukavemetli olan Titanyum malzemeleri keserken nitrür oluşumunu engellediğinden asal gazlardan argon gazı kullanılır. Argon gazı oksitlenmeyi ve kırılğan olan titanyum nitrürlerinin oluşumunu engellemektedir.

Yüksek kesim kalitesi istenen ve O_2 'nin kesim işleminde yer almasının istenmediği durumlarda He gazı kullanılır.

Cam, ahşap, kuvars, kompozit, polimer, alüminyum vb. malzemeleri keserken hava kullanılmaktadır (Ion vd., 2005).

Düşük karbonlu çeliklerin kesimi esnasında O_2 gazı kullanılır. Kesim sırasında O_2 ile tepkime gerçekleştiğinden malzemede renk değişimi gözlenir. Kesim esnasında ortamda O_2 bulunması ve kimyasal tepkimeyle birlikte malzemede oksidasyonun oluşması, lazer gücünün malzemeye etkisini artırmaktadır. O_2 basıncı seviyesi kesim yapılan malzemenin kalınlığına bağlıdır. Kalın malzemenin yanmasını engellemek amacıyla nozul çapı artırılır, O_2 basıncı azaltılır. Çok düşük gaz basınçlarında da ergiyen metal kesim yapılan yüzeyden uzaklaştırılmaz ve çapaklanmaya neden olur.

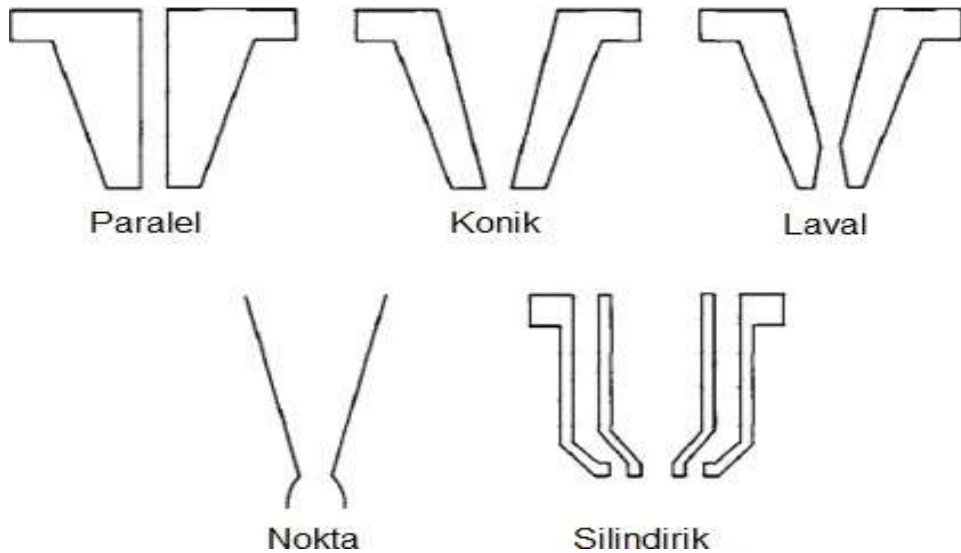
O₂ seviyesi %40 ve He %60 olan yardımcı gaz karışımı da yüksek kesim hızlarında kullanılabilir (Ion vd., 2005).



Şekil 2.14. Kesim işleminde kullanılan Azot (N₂) gazı

2.5.5. Nozul Tipleri

Kullanılan nozul şekli de kesim kalitesinin etkileyebilmektedir. Nozul çapları 0,5...5 mm aralığında değişmektedir. Nozul çapları malzemenin kalınlığına ve prosesin hassasiyetine göre belirlenmektedir. Küçük çaptaki nozullar kesimde pürüzlülüğü artırırken, büyük nozul çaplarında da fazla gaz akışı gözlenmektedir. Farklı profillere sahip nozuller kullanılabilir (Ion vd., 2005).



Şekil 2.15. Farklı nozul çeşitleri (Ion, 2005)

Nozul aşağıdaki nedenlerle kullanılır:

- Basıncı azaltarak optik kafadaki lens hareketlerini minimize eder.
- Kesim yapılan parça üzerindeki gaz basıncını kontrollü bir şekilde dengeleyerek ergime bölgesindeki kararsızlığı azaltır.
- Lazer ışını ile paralel olarak gaz akışı sağlar.

2.6. Lazer Kesme İşleminde Proses Parametreleri ve Etkileri

Literatür araştırması sonucunda birçok araştırmacının farklı malzeme türlerinin lazerle kesilmesi için proses parametrelerinin optimizasyonu konusunda çalışmalar yaptığı gözlenmiştir.

Paslanmaz çelik malzemelerin CO₂ lazer tezgâhı kullanılarak yapılan çalışmada değişken kesme hızı, farklı levha kalınlıkları, yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansı değişkenlerini kullanarak, farklı parametrelerin kesme kalitesine etkileri irdelenmiştir. Çalışmalar sonunda, tüm parametrelerin kesme kalitesini etkilediği ancak en önemli parametrelerin gaz basıncı ve kesme hızı olarak öne çıktığı görülmüştür. Malzeme kalınlığı & Yardımcı gaz basıncı, Kesme hızı & Yardımcı gaz basıncı, Lazer puls frekansı & Kalınlık parametrelerinin düzlemsellik, yüzey dalgalanması ve kesim kalitesine etkilerinin belirleyici olduğu gözlenmiştir (Yılbas,1998).

Rajaram ve diğerleri (2003), AISI 4130 kalite paslanmaz çelik numunelerini CO₂ lazer kesme tezgahında farklı lazer gücü ve kesme hızlarında keserek; yüzey pürüzlülüğü, kesim aralığı, oyuk sıklığı ve ITAB üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaliteli bir kesim yüzeyi elde edebilmek amacıyla değişken parametrelerin etkisinin belirlenebilmesi amacıyla istatistiksel modelleme amaçlı regresyon analizi ve iki faktörlü varyans analizi metodu kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar irdelendiğinde; kesme aralığında lazer güç seviyesinin kesme hızına göre öncelikli olduğu, lazer güç seviyesinin düşürülüp kesme hızı seviyesi yükseltildiğinde, kesim aralığının ve ITAB seviyesinin düştüğü, yüksek güç seviyelerinde ise kesim hızının artırılması kesme aralığının azalmasına ve ITAB büyüklüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışmada, kesim hızının artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığı tespit edilmiştir.

Jing Wang ve diğerleri (2021), Nikel temelli Inconel 625 Super Alaşım malzemenin Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM) kullanarak, değişken lazer kesim parametrelerinin kesme kalitesine etkilerini incelemiştir. Kesme hızı, lazer gücü, odaklama mesafesinin kesim alanındaki sıcaklığa çok büyük etkisinin olduğu ortaya çıkmıştır. En düşük yüzey pürüzlülük değerinin en yüksek test güç seviyesi olan 1100W ve en düşük test odaklama mesafesi olan 4 mm ve 8 m/dak kesme hızında kesim çizgilerinin ve kesim sonrası yüzeyin en iyi şekilde olduğu gözlenmiştir. Kesim kenarındaki en düşük yüzey pürüzlülük değerinin odaklama mesafesinin '0' olduğunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yüzey kesim deseninin dağılımı lazer gücü ve kesilen malzemenin kalınlığı ile direkt etkili olduğu görülmüştür. Lazer gücünün artırılması sebebiyle daha fazla plazma alevi oluşturulmakta ve yüzeyde daha fazla kavitasyona neden olmakta ayrıca yüksek miktarda malzemenin ergiyerek akmasına ve kesme yüzeyinin alt kısmına doğru akarak kesim yüzeyinde birikerek bozulmalara neden olmaktadır.

Son ve Lee (2020) SS41 ve SS304 malzemelerde lazer parametrelerinin kesime etkilerini incelemiştir. SS 41, Si ve Mn içeren daha düşük maliyetli ancak iyi mekanik özelliklere sahip yapı çeliği, SS304 ise Cr içeren yüksek korozyon dayanımına sahip paslanmaz çeliktir. Ayarlanabilir farklı lazer parametreleri; yaklaşma mesafesi, kesme hızı, lazer gücü, yardımcı gaz basıncı değişkenleri ile kesme kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Lazer gücü ve kesme hızının artırılması ile malzemeyi eritme genişliği artmaktadır. Alt ve üst kesim genişliği, eritme genişliği ve ITAB Enerji Hacmi ile analiz edilmektedir.

P_{lazer} : Lazer gücünü (W), V_s : Kesme hızını (mm/dak), A : Lazer ışınının odaklandığı alanı(mm²) göstermek üzere Enerji hacmi ise Denklem 2.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_{\text{Hacim}} = P_{\text{lazer}} / (V_s \times A) \text{ (J/m}^3\text{)} \quad (2.1)$$

SS 41 malzemede 3700W lazer gücünde malzemeyi eritme genişliği en geniş durumda 917 µm olarak elde edilmiştir. SS304 Malzemede 3100W kesme gücünde üst 796 µm, alt 375 µm kesme genişlikleri elde edilmiştir. Lazer gücü artırıldığında kesme genişliklerinin de arttığı gözlenmiştir. Özellikle yardımcı gaz basıncının Isıdan Etkilenen Bölgeyi

(ITAB) önemli ölçüde etkilediği ortaya konulmuştur. Lazer gücü arttığında malzemeye giren ısı miktarı artacak, ısı kaynaklı deformasyon artacak erime bölgesi genişliği ve ITAB genişliği de artacaktır. Lazer gücü ve kesme hızı Regresyon analizi yardımıyla modellenip, değişken parametrelerle kesim sonucuna etkileri irdelenmiştir. Özellikle SS304 paslanmaz malzemede Ni ve Cr bileşenlerinin ayrı ayrı lazer kesime etkilerinin detaylı araştırılması gerektiği üzerinde durulmuştur.

Irene ve diğerleri (2021) yaptıkları çalışmada işlem parametrelerinin ince paslanmaz çelik malzemelerin lazer kesim kalitesine etkilerini incelemiştir. Kesilen malzeme kalınlığı arttıkça kesim yüzey kalitesinin düştüğü gözlenmektedir. 50 mm kalınlığın üzerine çıkıldığında kesme kalitesinin bozulduğu yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmüştür. Daha düşük kalınlıklarda ise kesme hızı artırılarak kesim yüzey kalitesi olumlu etkilenmiştir. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin lazer gücüne nazaran daha önemli olduğu belirlenmiştir. 0,8 mm kalınlığında AISI 304 kalite paslanmaz malzeme 10 mm x 10 mm numuneler oluşturulacak şekilde Nd:YAG Lazer tezgahında kesilmiş ve farklı parametrelerle yüzey pürüzlülüğü ve oluşan çapak kalınlıkları değerlendirilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük frekans yüksek ilerleme hızlarında elde edildiği, düşük kesme hızı fakat yüksek frekans değerlerinde çapaklanmanın daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

Arcan (2011), odak noktası uzaklığı, kesme gazı basıncı ve kesme hızı değerlerini değiştirip, 5 mm kalınlıkta St 44 malzemede kesme parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkisini gözlemlemiştir. Bu çalışmayla değişken parametrelerle elde edilen sertlik değerleri malzemede faz değişimi olmaması sayesinde düşük çıkmakta ve kesim parametreleri optimize edilerek de daha kaliteli kesim yüzeyleri elde edilebilmektedir.

Öner (2008), CO₂ lazer kesim tezgahında AISI 304 kalite ince paslanmaz çelik malzeme; değişken lazer gücü, kesme hızı, puls frekansı değişkenleriyle, %100 yükte, 10 kg/cm² basınçta, odak, nozul çapı ve yardımcı gaz olarak N₂ sabit tutularak, farklı değişkenlerin oyuk oluşumu, kesme aralığı ve (ITAB) büyüklüğü üzerine nasıl etki ettiğini irdelemiştir. Yapılan testler sonucunda artan lazer gücü ve kesme hızlarında kesim kalitesi daha yüksek parçalar elde edilmiş, kesme hızının artırılması ile birlikte kesim aralığının da

arttığı gözlenmiştir. Kesim parçasının kalınlığının artması kesme aralığının artmasına neden olmuştur.

Andersson ve Granberg (2015) yaptıkları çalışmada CO₂ lazer tezgâhı kullanarak (Ti-6Al-4V) titanyum alaşımlı levha üzerinde Argon ve Nitrojen yardımcı gazlarını bağımsız olarak kullanarak 2, 3, 4 kW lazer gücünde, %30, %55 ve %80 lens odak uzaklığında, 1, 3,2 , 6,35 mm malzeme kalınlığında, 12, 16, 20 bar gaz basıncında, 0,5 , 1,5 , 2,5 m/dk. kesme hızında değişkenlerin ITAB, yüzey düzensizliği ve çapak yüksekliği değerlerini deney tasarım metodu kullanarak irdemiştir. Yüzey sertliği ölçümleri de yapılarak deney tasarım yöntemi ile deney planları hazırlanmıştır. Elde edilen çıktılarına göre kesilen malzeme kalınlığının ve kesme hızının en etkili iki parametre olarak öne çıktığını, lazer gücü ve gaz basıncının lazer kesim kalitesi üzerinde daha az etkili olduğunu belirlemiştir.

Ghany ve Newishy (2005), Nd:YAG lazer kullanarak 1,2 mm kalınlığında östenitik paslanmaz çelik malzemeyi keserek en ideal tezgah kesim parametrelerine ulaşmayı hedeflemiştir. Kesim sırasında sürekli ve darbeli modda, nitrojen ve oksijen gazları birbirinden bağımsız bir şekilde kullanılarak kesime etkileri gözlemlenmiştir. Kesim sonucu lazer kesim kalitesine etki eden parametrelerin öncelikli olarak; kesme hızı, darbe frekansı, lazer gücü ve odak pozisyonu olduğu belirlenmiştir.

En uygun kesim parametreleri olarak (Darbeli modda), Lazer gücü: 210 W, Frekans: 200-250 Hz, Kesme Hızı: 1-1,5 mm/dk, Gaz basıncı: 9-11 bar Nitrojen ve Gaz Basıncı: 2-4 bar Oksijen olarak bulunmuştur. Kesme hızı ve Frekans artırıldığında çentik genişliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Kesim sırasında kullanılan nitrojen gazı sayesinde, oksijene nispeten daha yumuşak ve temiz kesim yüzeyi elde edildiği ancak maliyetli olduğu gözlenmiştir.

Wandera ve Kujanpää (2011), 10 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzemeyi fiber lazer tezgahında keserek, optimum lazer kesme parametrelerini elde etmek üzere çalışmalarda bulunmuştur. Değerlendirilen parametreler; odak pozisyonu, kesme hızı ve odak uzaklığıdır. Parametreler optimize edilerek kesme yüzeyinde oluşan çapakların

engellenmesi hedeflenmiştir. Kesim işleminde; Lazer gücü: 4 kW, Nozul çapı(Ø): 2,5 mm, Yardımcı gaz (N₂): 20 bar, Nozul yaklaşma mesafesi: 0,7 mm şeklinde sabitlenmiştir. 24 farklı deney, Full faktöriyel deney tasarım metoduna göre tasarlanmıştır. Yapılan çalışmayla çapaksız kesim kenarları ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edebilmek amacıyla kesim hızının azaltılması, lazer ışınının daha iyi odaklanabilmesi için de odak uzaklığı daha fazla olan odak lensi kullanımı öngörülmüştür.

Erdoğan (2007), CO₂ lazer tezgahında St 37 malzemeyi delme işleminde, değişken parametrelerin delik kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Proses değişkenleri; Parça Kalınlığı: 1,2-4 mm, Lazer Gücü: 2500-4000 W, Odaklama mesafesi: (-4) - (-2) inch, Yardımcı gaz basıncı: 8-14 bar, Frekans: 500-1200 Hz olarak belirlenmiştir. Delme işlemi sonunda delik çapı, yeniden katılan bölge ve ITAB optik mikroskopla incelenmiştir. Değişen iş parçası kalınlığı değerleri için farklı işlem parametrelerinde optimizasyon yapılarak en uygun delme koşulları tespit edilmiştir.

Patel (2011), 6 mm kalınlığındaki Hardox 400 malzemeyi CO₂ lazer kesim tezgahında; Lazer gücü: 1000W, 1500W, 2000, Gaz basıncı: 0,5 bar, 0,6 bar, 0,7 bar , Frekans: 20 Hz, 25 Hz , 30 Hz ve Kesme Hızı: 200mm/dk, 400mm/dk, 600 mm/dk. parametrelerinde irdelemiştir. Çalışma sonunda kesme aralığının; gaz basıncı, lazer gücü, kesim hızı ve frekansa bağlı olarak değiştiğini belirlemiştir. Yapılan test sonuçları değerlendirildiğinde Lazer gücü: 1000 W, Kesme hızı: 200 mm/dk, Darbe frekansı: 25 Hz, Gaz basıncı: 0,6 bar değerlerinde en dar kerf genişliği elde edildiği gözlenmiştir.

Madiç ve Radovanović (2012) yaptıkları çalışmada CO₂ lazer tezgahında kesilen AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kesim sonucunda ortaya çıkan ITAB alanını incelemiştir. ITAB alanının matematiksel modeli lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve odak mesafesi kesim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Her parametrenin 3 farklı düzeyi için Taguchi metoduyla L27 ortogonal dizisine göre toplam 27 deney planı çıkarılmıştır. Farklı lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve odak pozisyonu değerlerinde deney yapılmıştır. Yapılan denemeler sonunda kesme hızının ITAB için en

önemli değişken olduğu görülmüş ve etki sırasına göre lazer gücü, odak noktası ve yardımcı gaz basıncının da ITAB alanı üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir.

Bernat ve diğerleri (2018) 6 mm kalınlığında yapı çeliği ile paslanmaz çeliği fiber lazer kesim tezgahında keserek, lazer gücünün ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerindeki etkilerini incelemiştir. Düşük yüzey pürüzlülüğü ve en iyi ölçüsel doğruluk değerlerini elde edebilmek için kesim hızının artırılarak, lazer gücünün azaltılması gerektiği öngörülmüştür.

Bununla birlikte, çalışmaların çoğu nispeten ince sacların (≤ 10 mm) kesilmesini hedeflemiştir (Ghany, 2005). Kalın metali keserken, malzemenin yüzeyinde erimiş metalin birikmesi ve delme işlemi sırasında oluşan ısının birikmesi, yardımcı hava akışında türbülansa ve aşırı ısı girişine neden olarak aşırı yanmaya neden olmaktadır. Ayrıca, yüksek güçlü fiber lazer kullanılarak kalın kesitli metal kesmenin, tipik CO₂ lazer kesimine göre daha karmaşık çizgi desenleriyle daha düşük kesim kalitesi ürettiği bildirilmiştir (Wandera, 2011).

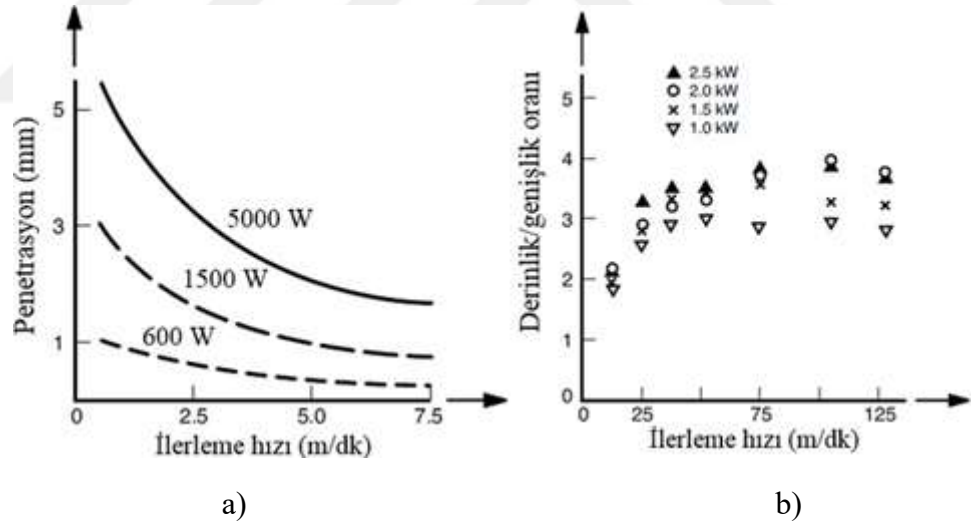
Bu nedenle, yaptığımız çalışmanın benzersiz yönlerinden biri, 20 mm kalınlığa sahip paslanmaz çelik malzemeyi fiber lazerle kesmek için parametre optimizasyonudur. Çalışmanın bir diğer yenilik yönü de farklı kesme parametrelerini (frekans, görev döngüsü) optimize etmeyi amaçlamasıdır. Optimize edilmiş kesme parametrelerinin genel olarak lazer gücü, odak konumu, gaz basıncı ve kesme hızı olduğu görülmüştür (Amaral, 2019). Öte yandan, ideal kesme parametrelerine ulaşmak için basit objektif optimizasyon yöntemleri yeterli olmayıp, zıt ve farklı hedeflerin bir arada optimize edilmesi gerekmektedir. Mevcut çalışma, yüzey pürüzlülüğü ve çentik genişliğini birlikte gözlemlemek için fiber lazer kesimde işlem parametrelerini optimize etmeyi amaçlayan Gri İlişkisel Analiz (GRA) açısından çok amaçlı bir optimizasyon tasarımı geliştirmeyi ele almaktadır.

Kaliteli düzgün bir kesim yapabilmek için lazer kesim parametreleri olan; ilerleme hızı, lazer gücü, odak mesafesi, görev döngüsü (duty cycle), lazer modu (darbeli veya sürekli), koruyucu gaz debisi ve türü doğru olarak belirlenmelidir. Literatürde yapılmış olan

çalışmalarda proses parametrelerinin farklı malzeme türlerinde ve çalışma koşullarında kesim kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılarak endüstriyel proseslerdeki deneme yanılma yoluyla yapılacak zaman kayıplarının, işçilik kayıplarının ve malzeme firelerin önüne geçilerek daha yüksek verim elde edilmesi hedeflenmektedir. Dolayısıyla gerçekteştirilecek kesim öncesinde numune kesim denemeleri yapılarak, en uygun proses parametrelerinin lazer kesim işleminde uygulanması önemlidir.

2.6.1. Lazer Gücü ve İlerleme Hızı

Lazer gücü, lazerle yapılan kesim işlemindeki en önemli değişkenlerden biridir. Lazerin gücü sayesinde lazer ışınının malzemeye nüfuziyeti ve kesim metodu direk etkilenmektedir. İlerleme hızı lazer gücü ile ayrılmaz bir parametredir. Diğer proses parametreleri sabit kabul edildiğinde artan lazer gücünde malzemeye nüfuziyet (penetrasyon) ve kesilen yüzeyin derinlik/genişlik oranı artmaktadır. Ancak aynı şartlarda ilerleme hızı artırıldığında yüzeyin kesim kalitesinin bozulduğu görölmektedir.



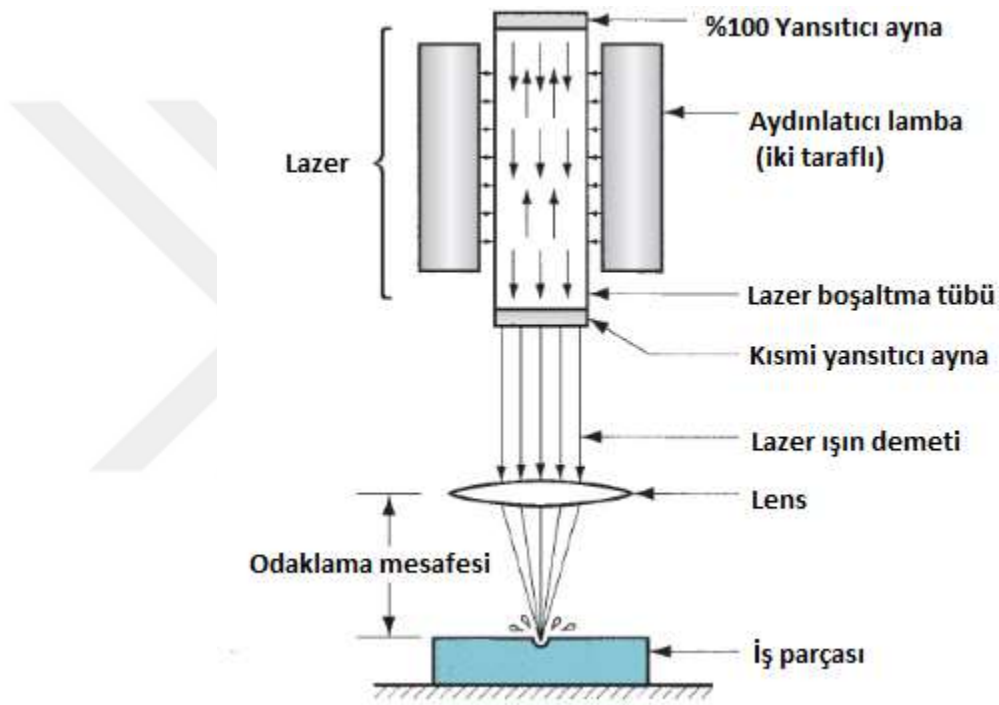
şekil 2.16. Lazer gücü ve ilerleme hızına bağlı a) penetrasyon derinliği gösterimi, b) derinlik/genişlik oranı gösterimi (Kannatey-Asibu, E. 2008)

Lazer gücü ve ilerleme hızı aynı zamanda kesilen malzemeye etki eden ısı miktarını da etkilemektedir. Tüm değişkenler sabit tutulduğunda lazer gücünün artırılması ve ilerleme hızının azaltılması ile birlikte kesim sırasında malzemeye uygulanan ısı girdisi de

yükselmiş olur. Tam tersi olarak da ilerleme hızının artırılması ve lazer gücünün düşürülmesi ile malzemeye uygulanan ısı girdisi düşmüş olur.

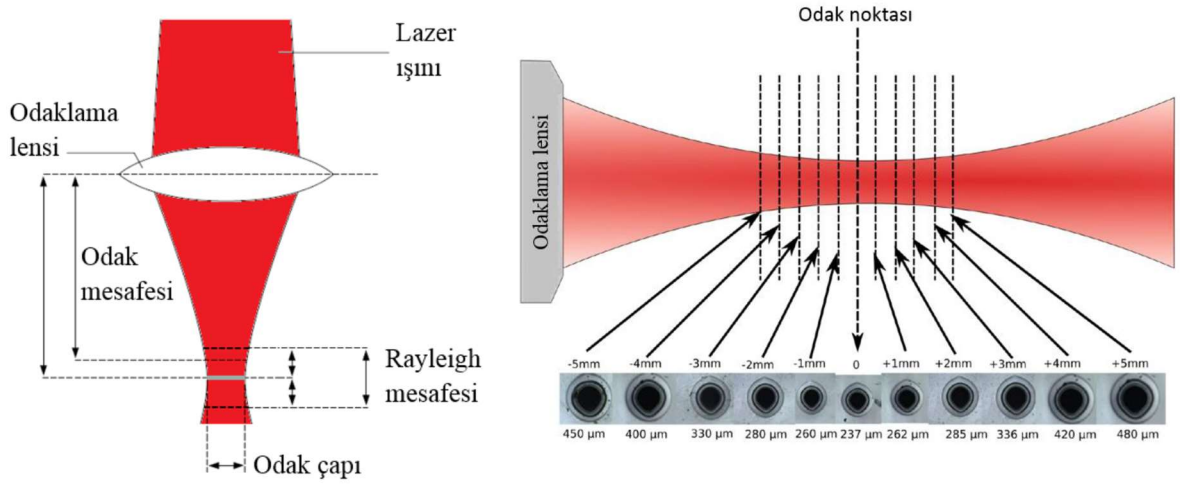
2.6.2. Odak Mesafesi

Lazer kesim işleminde ışının yoğunluğu ve noktasal kesim spotunun çapını oluşturmak amacıyla odak mesafesinin belirlenmesi çok önemlidir. Lazer ışını kesim yapılması planlanan bölgeye optik lenslerle fokuslanmaktadır.



Şekil 2.17. Odaklama mesafesi şematik gösterimi (Civilmint, 2023)

Kesim işlemini gerçekleştiren ışınlar lenste toplanarak odak noktasından geçirilip iş parçasına gönderilmektedir. Dolayısıyla odak mesafesi ve odak noktası tüm sistemin son çıkış noktası olarak hassas bir noktada bulunmaktadır. Odaklanması gerçekleştirilen ışının çapı, merceklerin boyutuna ve lazer ışınının çapına göre belirlenir. Odak mesafesine bağlı olarak noktasal kesim spot çapı değişmektedir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Gaussyen ışın odak mesafesi ve ışın çapları (Prakash ve Kumar 2017)

Parça yüzeyinin üzerinde, parça yüzeyinde ve parça yüzeyinin altındaki odak mesafelerinin kesime farklı etkisi mevcuttur. Negatif odak noktası lazer ışının malzemeye nüfuziyetini artırmaktadır. Kesme gücünün malzemeye daha fazla aktarılması sağlanır. Odak noktası malzeme kalınlığını üçte birine kadar malzeme içinde tutulursa ışının malzemeye etkili bir şekilde nüfuziyeti artmış olur (Karaaslan, 2009). Eğer odak noktası doğru belirlenemezse malzemeye etkiyen lazer ışını malzemede buharlaşmaya sebep olarak, istenilen lazer gücünün malzemeye aktarılmasını engelleyecektir.

Ayrıca lazer ışınının odak çapı kerf genişliğini direk etkilemektedir. Odak yüksekliği merceklerin mesafesine bağlı olarak değiştirilebilir. Küçük odak çaplarında lazer ışını dar olmaktadır. Kalın malzeme keserken kesim çizgilerinin dik olması ve ergiyik metalin alandan uzaklaştırılabilmesi için daha fazla odak mesafeleri ve büyük odak çapları kullanılmaktadır. Yüksek kesme hızlarına ulaşabilmek ve yüksek güç yoğunluğunu malzemeye aktarabilmek amacıyla odak çapı küçültülmelidir. Yapılacak kesim yöntemine ve malzeme kalınlığına göre odak noktası seçimi yapılır. Örneğin alevle kesim yapılacaksa odak noktası kesim yüzeyine yakın olmalıdır. Azot kullanarak ergitme hedefleniyorsa ergiyik malzemenin akışkanlığını azaltmak ve çapaklanmayı önlemek amacıyla odak noktası malzeme yüzeyinin içine doğru seçilmektedir. Endüstriyel uygulamalardaki tecrübelerle istinaden ince malzemelerde odak noktası yüzeye yakın,

kalın malzemelerde ise malzeme kalınlığının 1/3'ü kadar içerde seçilmesi uygun olmaktadır.

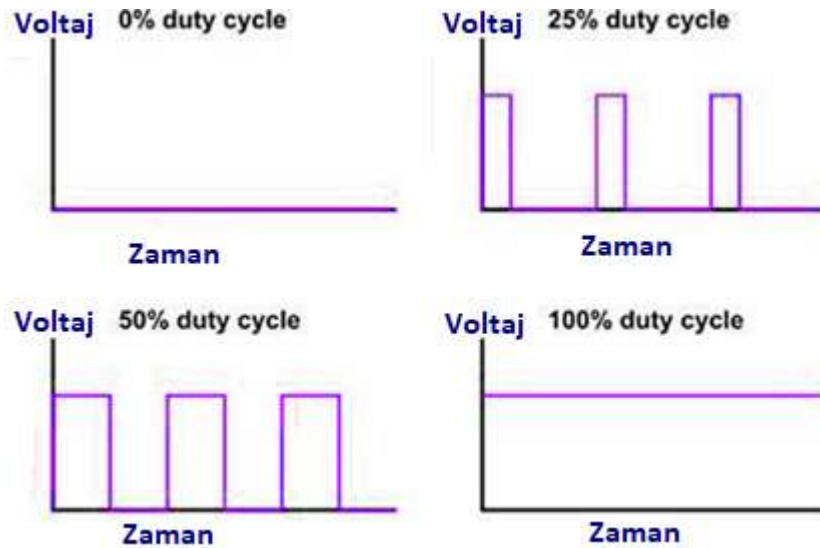
2.6.3. Frekans

Lazer, düzenli aralıklarla darbeler halinde ışın yaymaktadır. Frekans, darbelerin hızını belirlemektedir. Frekans düştükçe, darbe sayısı azalmakta, darbe başına enerji çıkış yükselmektedir. Frekans yükseldikçe darbe sayısı artmakta ancak darbe başına enerji çıkışı azalmaktadır. Düşük darbe frekansları malzemeyi buharlaştırma eğilimi göstermektedir.

2.6.4. Görev Döngüsü

Görev döngüsü (Duty cycle), lazer gücünün açık/kapalı oranını göstermektedir. Görev sayısı, açık oranın kapalıya göre daha yüksek olması daha fazla çıkış gücü anlamına gelmektedir. %100 görev döngüsü, sürekli dalga boyunda (CW) sistemin tam açık olduğu anlamına gelmektedir. Mesela %60 görev döngüsü belirlenen zamanda sistemin %60 oranında yüklemde aktif olduğunu, %40 oranında da pasif olduğunu ifade etmektedir.

$$\text{Duty cycle (\%)} = (\text{Pulse genişliği} / \text{Toplam zaman}) \times 100$$



Şekil 2.19. Görev döngüsü (Gophotonics, 2023)

2.7. Paslanmaz Çelik Malzemelerin Lazerle Kesimi

Paslanmaz çelik saclar savunma sanayi, petrol sanayi, makine parçaları, otomotiv, kimya sanayi, sıhhi tesisat ve gıda ekipmanları gibi birçok uygulamada kullanılan önemli mühendislik malzemeleridir. Paslanmaz çelikler arasında AISI 304 (DIN EN 1.4301) kalite grubu, kullanımın yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Magdum, 2022). Birçok avantajına rağmen paslanmaz çelikler, bileşimlerinde yüksek oranda krom bulundurdukları için oksijenle kesime uygun değildir.

Bu nedenle lazer kesim işlemi bu tür malzemelerin işlenmesinde çok önemli bir yere sahiptir (Kotadiya, 2016). Birçok araştırmacı, ürünün kesme yüzey kalitesi üzerinde önemli etkisi olan kesme parametrelerini ele almanın yanı sıra farklı deneysel tasarım yöntemleri yardımıyla optimizasyon üzerinde çalışmaktadır (Anković, 2016).

Li (2021), RSM (Yanıt Yüzey Metodu) ile kesme hızı, odak uzaklığı, lazer güç parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve çentik üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sürekli artan lazer gücünün yüzey pürüzlülüğünü azalttığını belirtmiştir. Ayrıca, Jadhav ve Kumar (2019), AISI 304 (DIN EN 1.4301) paslanmaz çelik malzemelerde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreleri incelemiş, lazer gücü ve gaz basıncının artmasının yüzey pürüzlülük değerlerini azalttığını vurgulamıştır. Lazer kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı tespit edilmiştir.

2.7.1. Paslanmaz Çeliklerin Genel Özellikleri

Krom elementi Paslanmaz çeliklere paslanmazlık özelliği kazandıran bir alaşım elementidir. Yunanca *Renk* kelimesinden türetilen krom (chromium) metalografik dağlama araçlarına ve oksidasyona karşı dirençli bir elementtir. Belirli oranlarda alaşıma eklendiğinde bu malzemelere paslanmaz çelik adı verilmektedir. Oksit tabakası oluşumu, demir ve alaşımlarının büyük bir kısmında olduğu gibi çeliklerde de atmosferde oksitlendiği görülmektedir. Bu husus demir ve demir alaşımlarının en büyük dezavantajlarından birisidir. Alüminyum ve çinkonun yüzeyinde oluşan oksit tabakası malzemeler için avantajlı bir durum oluştururken, çelikte ise yüzey kısmında oluşan oksit

tabakasının iç kısımlara doğru oksitlenmenin ilerlemesi durdurulamaz ve malzemede deformasyon başlar (Aydın, 2002).

Paslanmaz çeliklerin üzerinde oluşan sıkı ve ince oksit tabakası korozyon ve oksidasyon ilerlemesini engellemektedir. Korozyon direnci seviyesi ise artan krom miktarına göre direnç seviyesini yükseltmektedir. Çeliğin içindeki krom ve oksijen arasındaki ilişki ile bu koruma oluşmaktadır. Paslanmaz çeliklerin yüzeyinde krom oksit tabakası oluşmaz ise korozyon ve oksidasyon direnci hassaslaşmaktadır. Oluşan duruma aktif denilmektedir. Oksit tabakası oluşması durumunda paslanmaz çelikler oksidasyona karşı direnç göstererek pasifleşmiş olmaktadır. Bu oluşum için paslanmaz çeliğin bileşimi, türü, pasifleşmenin derecesi, sınırları ve ortamın aktivitesine göre oluşmaktadır. Paslanmaz çeliklerde eğer bu koşullar oluşursa pasifleşme kalıcı hale gelmekte ve korozyon hızı da oldukça yavaş bir hıza sahip olmaktadır. Paslanmaz çelik malzemede en az %12 oranında Cr bulunursa ve aynı zamanda ortamda da O₂ varsa korozyon direnci oluşabilir. İnce ve yoğun bir şekilde oluşan krom oksit, paslanmaz çelikte oksidasyonun ilerlemesini engeller ve korozyon dayanımı bakımından yüksek direnç oluşturur. Yüzeydeki pasif oksit tabakası paslanmaz çelikleri korozif etkiden korumaktadır. Krom miktarındaki artış pasif film tabakasındaki dayanımı belirlemektedir. Krom sayesinde çelik malzeme yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Paslanmaz çelikler bu sayede yüksek sıcaklıklarda sürünmeye dirençli *creepresisting* olarak da adlandırılmaktadır (Böhler, 2001).

Kimyasal bir işleme gerek duyulmadan paslanmaz çeliklerin yüzeyinde pasif bir tabaka oluşmaktadır. Yüzeyde film oluşumu oksijen tabakasının teması ile meydana gelmektedir. Fakat pasivasyon oluşabilmesi için yüzey pisliklerinin ve oksitlerin yok edilmesi ile koruma sağlanabilmektedir.

Paslanmaz çeliklerin tarihine bakıldığında araştırma ve inceleme çalışmalarında asitlere dayanıklılığı keşfedilmiştir. Bu durum aynı zamanda krom karbürleri çözelti haline getirerek, alaşımı daha sünek hale getirir. İlerleyen dönemlerde ferritik ve östenitik tipler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. II. Dünya savaşı sonrasında östenitik paslanmaz çelik imalatında azot ve mangan gibi elementler kullanılmıştır. Savaş boyunca nikel

elementinin bulunmasında zorluklar yaşanmıştır. İlerleyen yıllarda farklı ihtiyaçların ortaya çıkması ile çökelme sertleşmeli ve dubleks paslanmaz çelik türleri geliştirilmiştir (Kanbolu, 1996).

“Paslanmaz çeliklere ilave edilen elementleri incelersek;

- Karbon, kaynak metalini olumsuz etkilemektedir. Çünkü karbon düşük sıcaklıkta tokluğu ve korozyon direnci bakımından olumsuz bir şekilde etkilenmektedir. Karbon, mukavemeti yüksek olan alaşımlara sertleşme özelliği kazandırmak ve mukavemet seviyesini artırmak için kullanılmaktadır. Aynı zamanda karbon ferrit yapıcı bir elementtir.
- Krom, en büyük özelliği korozyona karşı koruma sağlayan bir alaşımdır. Aynı zamanda krom ferrit ve karbür oluşumunu sağlamaktadır. Fakat krom elementinin paslanmaz çeliklerde mukavemete önemli bir etkisi görülmemektedir.
- Nikel, krom elementi fazla olan ve karbon oranı düşük olan çeliklere katılmaktadır. Bu çeliklere katılmasının amacı yüksek sıcaklıklarda oluşan tane büyümesini engellemektir. Kaynak metal tokluğunu özellikle sıfır altı çeliklerde etkilediği görülmektedir. Nikel önemli derecede östenit yapıcı bir elementtir. Karbon elementinde olduğu gibi nikel de mukavemeti artırmaktadır.
- Titanyum, yaşlanma sertleşmesi etkisini azaltmak için yüksek mukavemete sahip çeliklere katılmaktadır. Miktar bakımından %12 kroma sahip kaynak metaline ilave edilmesi ile yapı ferritik hale dönüştürülür. Bu da yapıyı sertleşmez hale dönüştürmektedir. Titanyum, krom karbür çökmesini önlemek amacı ile özellikle östenitik çeliklerde kullanılır. Alüminyum ile birlikte ilave edilmesi durumunda yaşlanma sertleşmesini etkilemek için özellikle ısıya dayanıklı çeliklere katılmaktadır. Titanyum iyi bir ferrit yapıcı elementtir.
- Alüminyum, tufalleşme dayanımını özellikle yüksek sıcaklıklarda artırmaktadır. Oldukça yüksek derecede ferrit yapıcı bir elementtir.
- Mangan, özellikle östenitik alaşımların kaynak metal bölgesinde çatlama oluşumunu engellemektedir. Mangan aynı zamanda östenit yapıcı bir elementtir.
- Niyobyum, özellikle östenitik alaşımlarının krom karbür çökmesini dengelemektedir. Martenzitik paslanmaz çelikte oluşabilecek sertleşmeyi düşürmek için ilave edilir. Niyobyum elementi karbür yapıcı bir elementtir.

- Azot, düşük karbonlu, kromca zengin olan paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklarda oluşan tane büyümesini önlemek için ilave edilir. Azotun ilave edilmesi durumunda mukavemeti artmaktadır. Kaynak bölgesini tokluk bakımından özellikle sıfır altı (-) sıcaklıklarda olumsuz yönde etkilemektedir. Azot elementi östenit yapıcı bir elementtir.
- Fosfor, kükürt ve selenyum elementleri özellikle kaynak metalinde çatlama oluşumuna sebep olmaktadır. Bu elementlerden herhangi birisi zirkonyum ya da molibden elementleri ilave edilmesi durumunda, çelikte talaş işleme becerisi yükselmektedir.
- Silisyum, korozyon direncini artırmak için östenitik paslanmaz çeliklere ilave edilmektedir. Tufalleşme dayanımını özellikle yüksek sıcaklıklarda artırmaktadır. Silisyum elementi ferrit yapıcı bir elementtir.
- Tungsten, yüksek sıcaklık alaşımları sürünme dayanımını ve mukavemet dayanımını yükseltmek için ilave edilmektedir. Tungsten elementi ferrit yapıcı bir elementtir (Kaluç, 2007).

2.7.2. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Paslanmaz çelikler; korozyon direncinin yüksek oluşu, imalat kolaylığı, mekanik dayanımlarının yüksek oluşu, yüksek ve düşük sıcaklıklara dayanım, estetik görünüm, sağlığa uygun olması, uzun ömürlü oluşu ve hurda değeri gibi özelliklerinden dolayı endüstriyel imalatlarda tercih edilmektedir.

Korozyon direnci açısından incelendiğinde paslanmaz çeliklerin hemen hemen tamamı korozyona karşı yüksek dayanıma sahiptir. Alaşım yönünden düşük olan çelikler atmosferik korozyona karşı daha dayanıklı olup, alایش yönünden yüksek olan çelikler ise asitlere karşı dayanıklı olmaktadır. Klorür bakımından zengin olan çelikler ise alkali ortamlara karşı daha dayanıklı olup, yüksek basınç ve sıcaklıklarda kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik türlerinde, düşük ve yüksek sıcaklık dayanımı bakımından mekanik dayanımı ve tufalleşme açısından yüksek sıcaklıklarda dahi önemli bir azalma olmamaktadır. Oldukça düşük sıcaklıklarda bile tokluklarında bir azalma olmaz ve gevrekliklerini korumaktadır. İmalat kolaylığı açısından bakıldığında ise paslanmaz

Çeliklerin neredeyse tamamı talaşlı imalatlara, kaynak ve kesme işlemlerine, soğuk ve sıcak şekillendirmelere uygundur. Mekanik dayanım bakımından paslanmaz çelikleri ele aldığımızda neredeyse tamamı soğuk şekillendirme ile pekleşir ve bu sayede dayanımı artmış olur. Dayanımın artması sonucu daha ince kalınlıklarda elik üretilerek hem ağırlık hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlamaktadır. Bazı paslanmaz elik türlerinde ise ısıl işlem yoluyla önemli derecede dayanım kazandırılabilmektedir. Paslanmaz elikler farklı yüzey kalitelerinde retilbildiğinden, bakım kolaylığı açısından işletmelerde uzun süre kullanım ömrü boyunca ilk görünümlerini muhafaza edebilirler (Kaya, 2014).

2.7.3. Paslanmaz eliklerin Kullanım Alanları

19. yüzyılda metalurjistler tarafından birçok deneme yapılmasına rağmen ilk olarak 1910 ‘lu yıllarda Amerika’da ve Avrupa’da paslanmaya karşı dirençli alaşım metalleri katılarak elik malzemelerin korozyona karşı dirençli hale getirme çalışmaları yapılmıştır. 1912 yılında östenitik paslanmaz elik alaşımı için Krupp firmasının mühendisleri Eduard Maurer & Benno Strauss *ThyssenKrupp Nirosst* ismiyle patent almışlardır. İlk Ticari kelme sertleşmeli paslanmaz elik 1946 yılında üretilmiştir (Wikipedia, 2023). elik malzemelere asitli ortamlarda çalışma kabiliyeti kazandırabilmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. İhtiyaçların artması ve teknolojinin ilerlemesi ile birlikte çok farklı paslanmaz türleri geliştirilmiştir. Paslanmaz sac, levha, boru, profil gibi farklı kullanım şekilleriyle farklı sektörlerde yeni ürün tasarımlarında bakım kolaylığı, hurda değeri, korozyona karşı yüksek direnci gibi nedenlerle askeri alanda savunma sanayiinde, uzay ve havacılık sektöründe, füze gövdelerinde, deniz altı ve üstü araçlarda, yakıt ve sıvı tanklarında, yakıt boru hatlarında, uçakların gövde ve ekipmanlarında, raylı sistem araçlarında, gemi sektöründe, tıp alanında, mimari uygulamalarda, estetik amaçlı tasarımlarda, asansör ve yürüyen merdiven imalatlarında, mutfak ve ekipmanları üretimi gibi çok farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde, çalışma kapsamında yapılan kesimlerde kullanılan malzeme türleri, yöntemler ve araçlar tanıtılmıştır. Kesilecek malzeme türlerinin seçiminde Raylı Sistem endüstrisindeki kullanım oranları göz önüne alınmıştır. Bu doğrultuda araç gövdesinde taban, gövde ve şasi komponentlerinde tercih edilen AISI 304 (DIN EN 1.4301) paslanmaz çelik levha tercih edilmiştir. Yapılan çalışmada, AISI 304 Paslanmaz çelik malzemenin fiber lazer ile kesiminde proses parametrelerinin (kesme hızı, basınç ve frekans) aynı anda minimum kerf genişliği ve minimum yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bu levhaların büyük bir kısmı korozyon dayanımı ve rijitliği açısından araç gövdesinde kullanıldığı için malzeme seçiminde bu kriter de göz önünde bulundurulmuştur.

Çalışma kapsamında deneysel tasarım metotlarından Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca ölçülen değerler kullanılarak ANOVA Analiz yöntemi ile parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve kesim parametrelerinin kesim kalitesi üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemenin Seçimi

Fiber lazer kesim, piyasada kalınlığı 2 mm'nin altındaki ince saclarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha kalın paslanmaz çelik malzemeler, endüstriyel uygulamalarda genellikle CNC Router tarafından kesilmektedir. Fiber lazer teknolojisinin mükemmel avantajları ile birlikte yeni bir yaklaşım geliştirebilmek için çalışmamızda 20 mm kalınlığında AISI 304 (DIN EN1.4301) kalite paslanmaz çelik malzemenin CNC kontrollü fiber lazerde kesim işlemi uygulanmıştır. Malzemeye ait Mekanik & Fiziksel özellikleri ve Kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de verilmiştir. Özellikler Paslanmaz Çelik Üreticisinden EN 10204 3.1 Kalite Belgesine göre alınmıştır [Ek-1].

Çizelge 3.1. Paslanmaz çelik malzemenin özellikleri AISI 304 (DIN EN 1.4301)

Kimyasal Bileşimi	C(%) = 0.020	Mn(%)= 1.30	Si(%)= 0.44	P(%)= 0.036
	S(%) = 0.0021	Cr(%)= 18.36	Ni(%)= 8.05	Mo(%)= 0.164
	Al(%) = 0.0038	Co(%)= 0.179	Cu(%)= 0.2591	N(ppm)= 475
Mekanik Özellikler	Sertlik 89.33 HRB	Akma Dayanımı (0.2%) 407 MPa	Çekme Dayanımı 674 MPa	Esneklik Modülü 200 kN/mm ²
Fiziksel Özellikler	Yoğunluk 7.9 g/cm ³	Özgül Isı Kapasitesi 500 J/kg K	Isı İletkenliği 15 W/m K	Elektriksel özdirenci 0.73 Ω mm ² /m

3.2. Deney Tasarımı

Bu deneysel çalışmada numuneler hazırlanırken Lazer kesim tezgahı olarak; 8 kW Lazer gücünde, maksimum ivmesi 30 m/s² olan, 240 m/dak (X, Y) eksen hızlarına sahip NUKON marka VENTO LINEAR 315 8000W Linear Motorlu Fiber Lazer Kesim makinesi kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Vento Linear 315 Fiber Lazer Tezgâhı



Şekil 3.2. Kesim yapılan Vento Linear 315 Fiber Lazer Atölye Görüntüsü

Kesim sırasında 200 mm odak lensi, Ø5 mm nozul ve sürekli (CW) modda lazer ışını kullanılmıştır. Yapılan tüm kesimlerde yardımcı gaz olarak 12 bar sabit basınçta N_2 gazı kullanılmıştır.

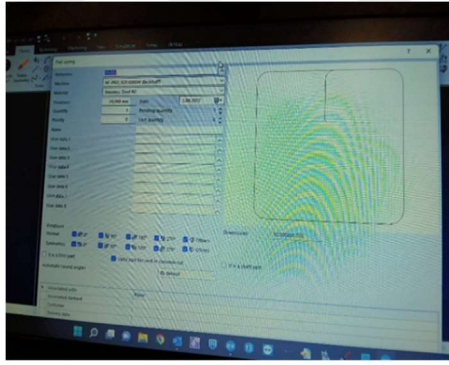


Şekil 3.3. Kesimde kullanılan N_2 gazı

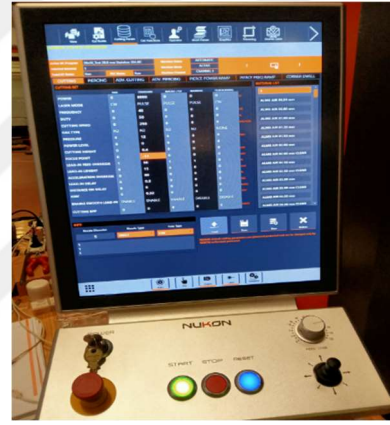
Yapılan ön denemeler sonucunda belirlenen kesme işlemi parametre seviyeleri ve parametre aralıkları seçilmiştir (Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2. Fiber lazer kesim proses parametreleri ve seviyeleri

Parametreler	Birim	Sembol	Seviye I	Seviye II	Seviye III	Seviye IV
Kesme Hızı (Cutting Speed)	mm/min	CS	250	270	290	310
Odaklama (Focal Position)	mm	FP	-11	-12	-13	-14
Frekans (Frequency)	Hz	F	45	65	85	105
Görev Döngüsü (Duty Cycle)	%	DC	50	60	70	80



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.4. Tezgâhın kontrol panelinden (a) Kesim profilinin yüklenmesi b) Parametrelerin girilmesi c) Kesim başlangıç referans yüzeyinin belirlenmesi d) Kesim resetleme işlemi

Deney numuneleri 20x50x50 mm ölçülerinde 20x1000x1000 mm AISI 304 (DIN EN 1.4301) levhadan 16 adet olarak kesilip çıkarılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Numune parçaların ana levhadan kesilerek çıkartılması

Kesme işleminden sonra Time Technology 3221 ölçüm cihazıyla numunelerin kesme yüzeylerindeki pürüzlülük profili (Ra), (Rz), (Rt), (Rq) değerleri aynı ekseninde üç farklı noktadan ölçülerek kayıt altına alınmıştır. Ra değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak analizlerde kullanılmıştır (Şekil 3.6).



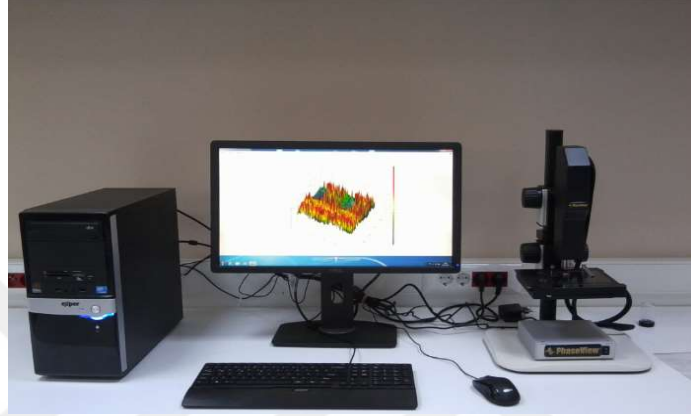
Şekil 3.6. Pürüzlülük ölçüm cihazı

Kesimi gerçekleştirilen tüm parçaların üst yüzeylerinden kerf genişlikleri, Mitutoyo PJ-A3005D-50 model projeksiyon ile ölçülmüştür (Şekil 3.7). Her bir numune üzerinde eşit aralıklarla belirlenen üç farklı noktadan ölçümler kayıt altına alınmıştır. Bu üç ölçümün aritmetik ortalaması, o numunenin kerf genişliği olarak kaydedilmiş ve yapılan analizlerde kullanılmıştır. Bu işlem her numune için tekrarlanmıştır.



Şekil 3.7. Projeksiyon cihazı

Optik profilometre cihazı sayesinde katı malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ölçülerek üç boyutlu (3D) yüzey profili çıkarılabilmektedir. Phase view marka , 50 nm – 10 mm parça kalınlığında, Pürüzlülük, Topoğrafya, Adım Yüksekliği ölçümleri yapabilen, 2592 x 1944 (5 MP) kamera çözünürlüğüne sahip, x20 objektif lensle 1 mm x 0,85 mm görüş alanı taraması yapabilen optik profilometre cihazımızla yüzey topoğrafya ölçümleri elde edilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Optik Profilometre Cihazı (Karabük,2022)

3.3. Yöntem

3.3.1. Parametre Optimizasyonu

Tez çalışmasının bu kısmında; paslanmaz çelik malzemenin fiber lazerle kaliteli bir kesim işlemi için gerekli değişkenlerin optimizasyonunda uygulanan yöntemler ve yapılan çalışmalar, detaylı olarak anlatılmıştır.

Birden çok değişkenin, belirli bir süreç üzerinde oluşturduğu etkileri aynı anda incelemek amacıyla kullanılan istatistiki tekniğe Deney tasarımı adı verilmektedir. Bu kavram ilk olarak 1920’li yıllarda ortaya atılmıştır (Fisher,1922). Deney tasarımıdaki amaç, genel anlamda bir sürecin ortaya koyduğu davranışları kayıt altına alarak, sürece ait kalite özelliklerine etki eden faktörleri belirleyip, süreçleri iyileştirebilmek amacıyla faktörlerin olması gereken seviyelerini belirlemektir. Böylelikle en iyi performans seviyesinin elde edilebildiği optimum faktör seviyeleri belirlenerek, uygulanan sürecin kalitesinde iyileştirme sağlanmaktadır (Biçer, 2020).

Deney tasarımı yöntemi, üretim süreçlerinde iyileştirmeler, yeni ürün tasarım faaliyetleri, mevcut süreçleri ve mevcut ürünleri iyileştirme gibi çok farklı mühendislik alanlarında kullanılabilen bir tekniktir. Deney tasarım teknikleri sayesinde yürütülen mevcut süreçlerdeki değişkenlikler azaltılırken, süreçlerden ve/veya ürünlerden istenilen performans karakteristikleri olumlu yönde geliştirilebilmektedir (Roy, 2001).

Deney tasarım yönteminin amacı, çözümü üzerinde değerlendirme yapılan problemin hakkında elde edilebilecek bütün bilgileri minimum zaman, minimum işçilik ve en az deney ekipmanlarını kullanarak detaylı bir şekilde ortaya çıkarıp modelleyerek, kalite özelliklerine etkisi olan faktörleri tespit etmektir.

İstatistiksel deney tasarım yöntemi sayesinde parametre tasarım aşamasında kontrol edilebilen ve edilemeyen tasarım faktörlerinin ürün kalite performansına etkileri belirlenebilmektedir. Bir ürün için ortaya konulan hedeften farklı olarak ortaya çıkabilecek sapmalar kalitesizlik maliyetlerine sebep olacaktır. Dolayısıyla bir ürün tasarımı yapılırken süreçleri ile birlikte en optimum şekilde dizayn edilmeli ve doğru bir

parametre tasarımı yapılmalıdır. Deney tasarımı sayesinde çevrim dışı bir kalite kontrol mekanizması kurulabilmektedir. Kontrol edilebilir faktör seviyeleri, kontrol edilemeyen faktörlerin ürün üzerindeki etkisi minimum olacak şekilde süreçler tasarlanmaktadır. Böylelikle ürünle ilgili doğru bir süreç tasarımına ulaşılmış olur (İncel, 2016).

3.3.2. Taguchi Metodu

Dr. Genichi Taguchi'nin geliştirmiş olduğu Taguchi yöntemi sayesinde Deney tasarımı teknikleri endüstride son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Taguchi, farklı sayısal ve deneysel araştırmaların süreç parametrelerini optimize eden basit ve önemli bir teknik sağlayan en yaygın Deney Tasarımı (DOE) Analiz Yöntemlerinden biridir (Yuce, 2021).

Taguchi deney tasarımı 5 ana aşamadan oluşmaktadır;

- Problemin belirlenmesi,
- Faktör ve seviyelerin belirlenmesi,
- Uygun ortogonal dizinin seçimi,
- Deneyin uygulanması-verilerin analizi
- Doğrulama deneyi olarak sayılabilir.

Problemin çözümü için belirlenen kalite parametreleri, ürüne ait kalite karakteristiklerini yansıtacak ve deney sırasında veri olarak kayıt altına alınabilecek değişkenler olmalıdır. Bu değişkenler nicel (ölçülebilir) olmalıdır. Nitel olup deneye eklenmesi gereken parametreler varsa, bu nitel parametreler için de nicel puanlama yapılarak ölçülemeyen parametrelerin ölçülebilir hale getirilmesi sağlanır. Deneyde kullanılacak ekipmanlar, aletler, ölçüm metotları ve gerekli standartlar bu aşamada belirlenmektedir. Deney tasarımcısı, bilgi birikimi, tecrübesi ve literatürde daha önceden yapılmış çalışmalardan da faydalanan beyin fırtınası (brain storming), sebep-sonuç çizelgesi gibi araçlarla hedef değerden uzaklaşmaya sebep olabilecek faktörlerle birlikte aynı zamanda faktör seviye sayıları da belirlenir. Seviye sayısı gerçekleştirilecek deney sayısını doğrudan etkilediğinden, Taguchi yöntemine göre seviye sayıları mümkün oldukça az sayıda seçilmelidir (İncel, 2016).

Taguchi metodu, çok sayıda faktör ve faktörlerin seviyesinden meydana gelen sistemlerde en ideal faktör kombinasyonunu verdiğinden, faydalandığı ortogonal diziler marifetiyle gerçekleştirilmesi gereken deney sayısını da en az seviyede gerçekleştirebilmektedir (Mercan, 2009).

Zaman ve maliyet avantajı sağladığından sıklıkla tercih edilen Taguchi yönteminden, bu tez çalışmasında da faydalanılmıştır. Taguchi ortogonal dizileriyle birçok faktör incelenemediğinden, faktör seviyeleri ayrı ayrı değiştirilmek yerine aynı anda eş zamanlı olarak değiştirilerek en az sayıda gerçekleştirilecek denemeye hedefe ulaşılmaktadır. Örnek verecek olursak; 2 seviyeli ve 7 faktörlü tam faktöriyel tasarım yapıldığında 128 adet farklı deney yapılması gerekirken, Taguchi metodu sayesinde bu sayı 8 olmaktadır. Böylelikle kullanıcı büyük ölçüde zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamış olur. Her bir faktör için aynı miktar farklı seviyesi bulunan iki seviyeli ortogonal dizilerde L4, L8, L16, L32 dizileri kullanılırken, üç seviyelilerde L9, L18, L27 dizileri kullanılmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında lazer kesim prosesindeki parametrelerin optimum değerleri Taguchi deneysel tasarım metodu yardımı ile tespit edilerek yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Klasik deneysel tasarım yöntemleri sistemi etkileyen faktörlerin sayısındaki artışa bağlı olarak deney sayısını da arttırmakta, süre ve maliyet açısından verimsiz sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Taguchi yöntemi ile daha az sayıdaki deney ile faktörlerin etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi mümkün olabilmektedir.

Taguchi metodunda öncelikle en iyi ortogonal düzenin belirlenmesi gereklidir. Taguchi metodunda birden çok deneysel durumu ortaya koyabilmek amacıyla farklı ortogonal diziler oluşturulmaktadır. Ortogonal dizi sayesinde klasik metottan farklı bir şekilde faktör kademeleri tek tek değiştirilmek yerine aynı anda eş zamanlı olarak değiştirilerek çok sayıda faktörün minimum sayı ile test edilmesi sağlanmaktadır. Ortogonal diziler problemin özelliğine göre farklı kademe sayılarında belirlenmektedir. Genel olarak 2 seviyelilerde L4, L8, L16 dizileri kullanılırken, 3 seviyelilerde ise L9, L18, L27 dizileri kullanılmaktadır. Toplam serbestlik derecesi ve düzey sayısına göre dizilerin seçimi

yapılmaktadır. Tam faktöriyel deneysel tasarımlarda çok sayıda yapılması gereken denemelerin sayısı, Ortogonal diziler sayesinde büyük oranda azaltılabilmektedir. Örneğin tam faktöriyel tasarımla $3^4 = 81$ farklı deneme yapılması gerekirken, ortogonal dizi marifetiyle 9 tane deneme yapılması yeterli olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında dört farklı işlem parametresinin dört farklı seviyesi için L16 ortogonal dizini kullanılmıştır. Yani Taguchi deneysel tasarımı 4 sütun ve 16 satırdan oluşmuştur.

Taguchi yöntemi, Ortogonal dizileri (OA) kullanmaktadır. OA'yı doğru bir şekilde bulmak için, başlangıç adımında Toplam Serbestlik Derecesi (DOF) tanımlanmalıdır. Her bir proses parametresinin Serbestlik Derecesi (DOF), tasarım değişkeni değerinden bir çıkarılarak elde edilir. Proses parametreleri olarak ilerleme hızı, odak mesafesi, frekans ve görev döngüsü seçilmiştir. Bu çalışmada, dört seviyeli (hız, odak konumu, frekans ve görev döngüsü) dört faktör olduğundan, seçilen Ortogonal dizilerin (OA) DOF' u, toplam DOF 'tan daha yüksek olması gereken L16 olarak seçilmiştir. Odak mesafesinde seçilen eksi seviyeler lazer ışınının parça yüzeyinden ne kadar içeride odaklandığını göstermektedir.

Taguchi Yönteminde, yanıtlar üzerindeki parametrelerin etkisini ortaya koyabilmek amacıyla, faktörlerin istenen özelliklerinin bir hassaslık göstergesi olarak sinyal-gürültü oranları (S/N) uygulanmıştır. (S/N) oranlarının performansı üç kategoride değerlendirilebilir; daha büyük daha iyidir, daha küçük daha iyidir ve nominal en iyi anlamlarına gelmektedir. Bu araştırmada, Yüzey Pürüzlülüğü (SR) ve Kerf Genişliği (KW) minimizasyonu amaç fonksiyonlarıdır, ayrıca seçilen S/N oranları ne kadar küçükse o kadar iyidir; burada yi, i'nci parametrenin deneyinden gelen yanıt verilerini ve n ise deney sayısını tanımlamaktadır (Denk. 3.1).

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3.1)$$

3.3.3. Gri İlişkisel Analiz (GRA) Yöntemi

1982 yılında Tayland Hua Chung Bilim ve Teknoloji Üniversitesinden Prof. Dr. Judong Deng tarafından geliştirilen Gri İlişkisel Analiz (GRA) teorisi, karar verme ve analiz yöntemidir. Bu teori; gri tahmin, gri modelleme, gri karar verme ve gri ilişkisel analiz gibi farklı alt alanlarda uygulanabilmektedir. Gri sistem teorisi farklı alanlarda tercih edilen bir analiz yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Dneg'in geliştirdiği teoriye göre beyaz bilginin tamamen sahip olduğunu, siyah bilginin kesinlikle sahip olunmadığını, gri ise bazı bilgilerin bilindiğini bazılarının ise bilinmediğini göstermektedir. Tamamlanmış veya bilinmeyen bilgi *Gri eleman* olarak isimlendirilmektedir. Beyaz sistemde ilişki durumunda faktörler kesinlik ifade ederken, gri sistemde kesinlik olmamaktadır (Yılmaz & Güngör, 2010).

Gri İlişkisi analiz edilen parametrelerin birbiri arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları olarak isimlendirilir. Gri ilişki sayesinde sistemdeki iki veya daha fazla değişkenin veya elemanın arasındaki ilişki değerlendirilmeli ve karara varabilmek için gri bölgenin de çözülmesi gerekmektedir (Sarpkaya, 2014).

Gri ilişkisel analiz yöntemiyle belirlenen sistemde referans kabul edilen serilerle faktör serilerinin arasında gerçekleşen etkileşim derecesini belirlemek için kullanılmaktadır. Her parametreye ait seriler dizilim içinde satırlar ve sütunlar olarak gösterilmektedir. Değişkenler arasındaki etkileşimin miktarı ise gri ilişkisel derece olarak isimlendirilir (Yıldırım, 2011).

Çoklu yanıtta değişken parametreleri tanımlamak için kullanılan Taguchi Yönetimi'nin yanı sıra çoklu yanıtların karmaşık ilişkisini etkili bir şekilde tanımlayabilmek amacıyla GRA Yöntemi de kullanılmaktadır. Bu metodoloji ile, öncelikle yanıtların performansı bir karşılaştırılabilirlik dizisine dolayısıyla tüm karşılaştırılabilir ve tahmin edilen ideal hedef dizileri arasındaki Gri İlişkisel Katsayısına (GRC) dönüştürülür.

Ancak, Gri İlişkisel Katsayısı (GRC) kullanılarak, referans dizi ve karşılaştırılabilir her dizi elde edilebilir. Bir karşılaştırılabilirlik dizisi, referans dizi ile karşılaştırılabilir dizi arasında hesaplanan en yüksek Gri İlişki Derecesine (GRG) sahip bir yanıt aktarılırsa optimum yanıt elde edilebilir.

Bu çalışmada GRA'da kullanılan veriler normalize edilmiştir. Daha düşük pürüzlülük ve kerf genişliği istendiğinden, normalizasyon için Denklem 3.2 kullanılmıştır. Bu denklemde $\min x_i^0(k)$, $x_i^0(k)$ 'nin minimum değerini, $\max x_i^0(k)$ maksimum $x_i^0(k)$ 'yi ve $y_i(k)$ normalleştirilmiş değeri temsil etmektedir. x^0 ayrıca en iyi optimize edilmiş değeri göstermektedir.

Deney sonuçları normalize edilirken aşağıda gösterilen üç farklı yaklaşım dikkate alınmaktadır.

“En Yüksek En İyi” durumunda orijinal dizin şu şekilde normalize edilir;

$$x_i(k) = \frac{x_i^0(k) - \min x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3.2)$$

“En Düşük En İyi” durumunda orijinal dizin şu şekilde normalize edilir;

$$x_i(k) = \frac{\max x_i^0(k) - x_i^0(k)}{\max x_i^0(k) - \min x_i^0(k)} \quad (3.3)$$

“Nominal En İyi” durumunda ise orijinal dizin şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$x_i(k) = \frac{|x_i^0(k) - x^0|}{\max x_i^0(k) - x^0} \quad (3.4)$$

Burada $x_i^0(k)$, i. serideki ve k. sırasındaki orijinal değer, $x_i(k)$, gri ilişkisel oluşum normalizasyon sonrasındaki i. serideki k. sıradaki değer, $\max x_i^0(k)$, $x_i^0(k)$ değerinin

maksimum değeri, $\min x_i^0(k)$ ise minimum olduğu değerdir. x^0 ise, istenilen ideal değeri göstermektedir.

Normalizasyon sonrasında, gerçek ve ideal dizi arasındaki ilişkiyi ortaya koyabilmek için Gri İlişkisel Katsayısı (GRC) belirlenmiştir. GRA yönteminde, her yanıt için ağırlık faktörünün belirlenmesi çok önemlidir. Ancak yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğinin kesme yüzeyi kalitesi üzerindeki etkisi diğer kalite karakteristiklerine göre daha fazladır. Bu nedenle, yanıtların ağırlıkları, makul bir gerekçe olmadan önemini artırmak veya azaltmak için seçilmemelidir. Çalışmaların çoğunda yanıtların ağırlıkları genellikle eşit olarak belirlenmiştir. ξ tanımlama katsayısını temsil eder 0...1 arasında değerlendirilir ve genellikle 0.5 olarak kabul edilir. Δ_{0i} 'nin maksimum değeri $\Delta_{\max}$ ve minimum değeri ise $\Delta_{\min}$ olarak gösterilir. $y_0(k)$ karşılaştırılabilir diziyi ve $y_i(k)$ ise referans diziyi ifade eder. Δ_{0i} aynı zamanda $y_0(k)$ ve $y_i(k)$ arasındaki farkı gösterir.

$$\gamma_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{\max}} \quad (3.5)$$

$$\Delta_{0i}(k) = \|y_0(k) - y_i(k)\| \quad (3.6)$$

Son adımda ise normalleştirilmiş ağırlık faktörü yardımıyla Gri İlişkisel Seviye (GRG) elde edilir. Gri İlişkisel Seviye (GRG), karşılaştırılabilir diziler ve referans diziler arasındaki korelasyon seviyesini gösterir. Kesme işlemi parametrelerinin en iyi optimum seviyesi, en yüksek Gri İlişkisel Seviye (GRG) ile gösterilir.

$$GRG = \sum_{k=1}^n \omega_k \gamma_i(k) \quad (3.7)$$

$\sum_{k=1}^n \omega_k = 1$ ve ω_k her bir yanıtın normalize edilmiş ağırlık faktörünü göstermektedir.

3.3.4. Varyans Analizi (ANOVA) Yöntemi

Varyans Analizi (ANOVA), etki oranını belirlemek ve analiz sonuçlarına göre parametreleri sıralamak için yaygın olarak kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. *ANOVA*

Analysis of Variance ifadesinin kısaltılmışıdır. Varyans analizinin amacı, sonuca etkisi olan faktörlerin çıktı (output) değerlerini ne kadar etkilediği ve farklı seviyelerde hangi oranda etkili olduğunu tespit etmektir. Böylece ortaya konulan çalışmaların sonuçları istatistiksel olarak da güvenilirliği belirlenmiş olmaktadır (Jeffrey vd., 2011).

Bu araştırmada, her bir proses değişkeni parametresinin yanıtlar üzerindeki etkisi (Yüzey Pürüzlülüğü ve Kerf Genişliği) ANOVA ile açıklanmıştır. Bu yöntem sayesinde istatistiksel analizin değeri %95 güvenlik düzeyine eşit olmaktadır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak oluşturulan deney tablosuna göre gerçekleştirilen farklı lazer kesim parametrelerine bağlı olarak yapılan deneyler sonucu 16 adet numune elde edilmiştir.

Elde edilen numunelerin kesme yüzeyi morfolojilerini incelemek için optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Kesme yüzeylerinin 3 boyutlu topolojik haritaları aşağıda sırasıyla verilmiştir.

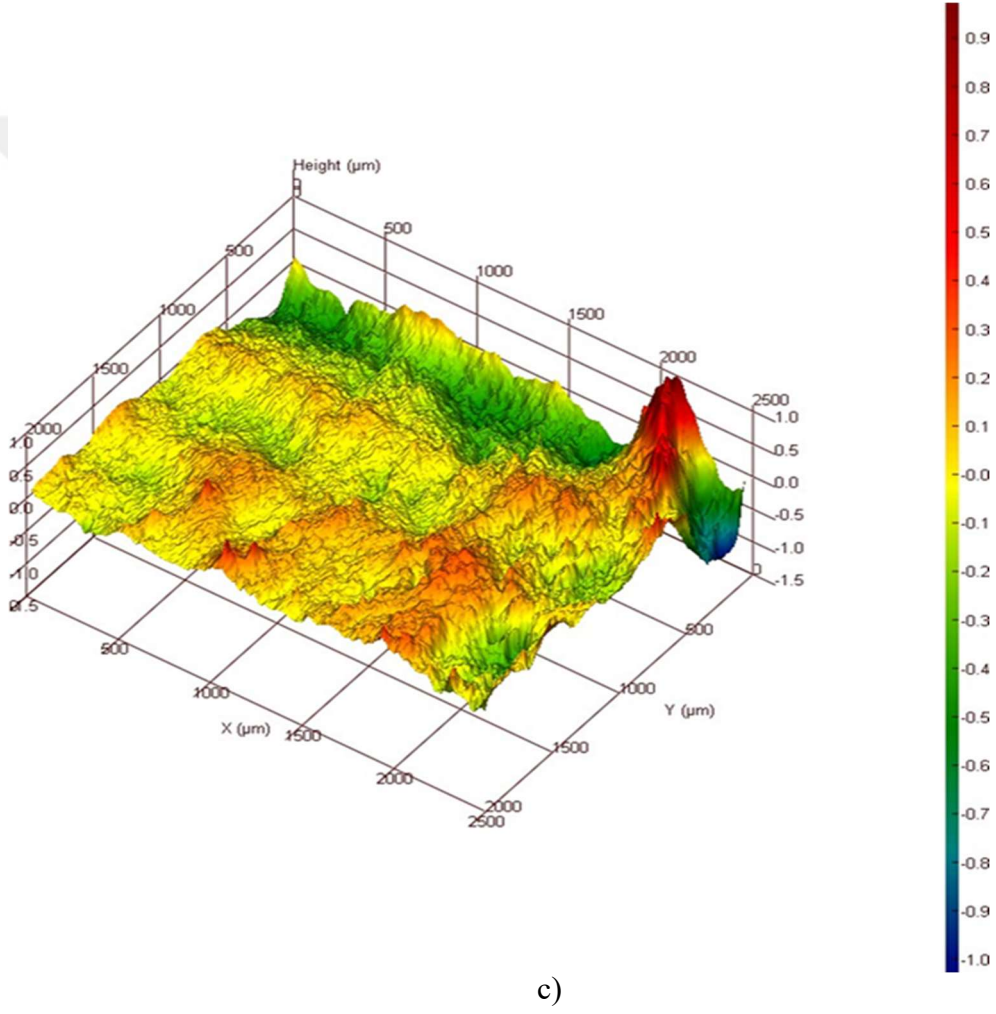




a)



b)



c)

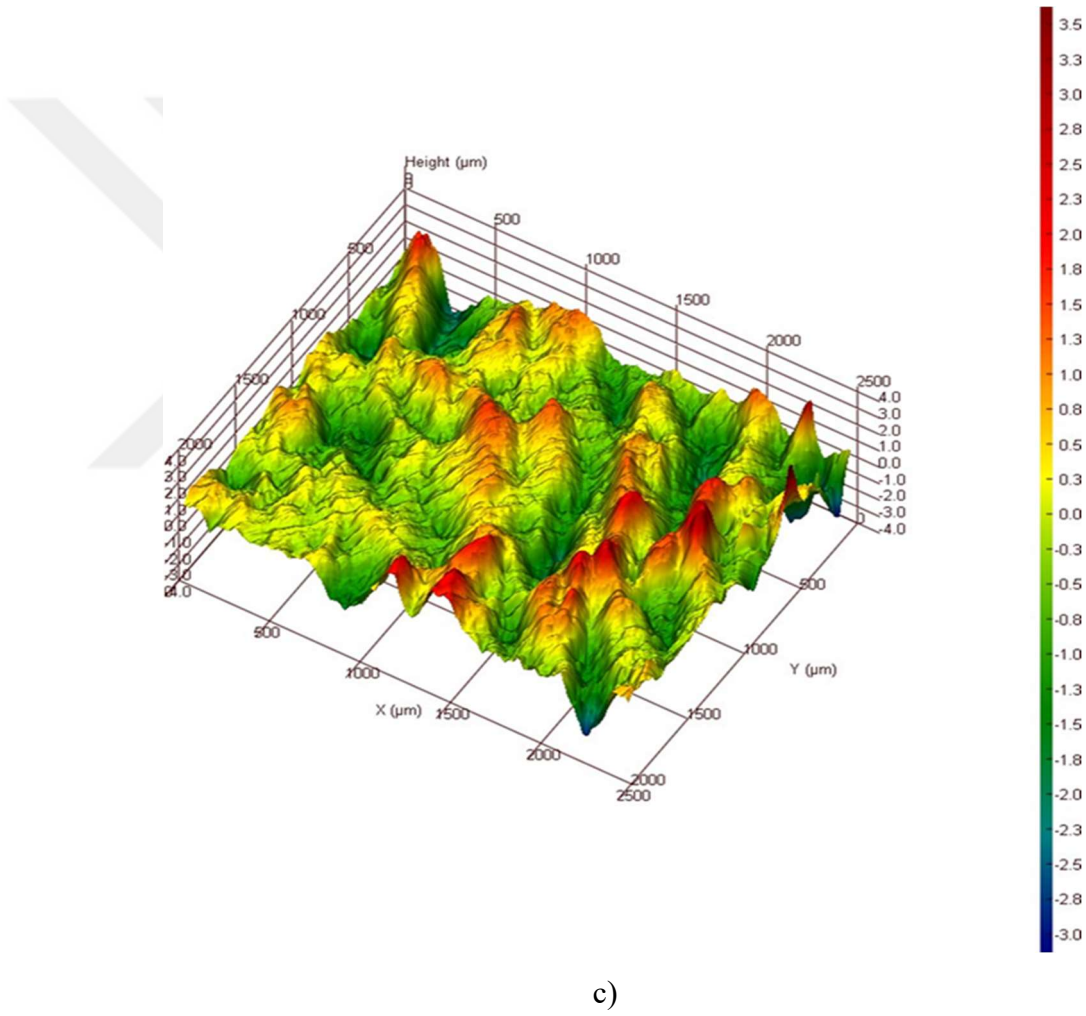
Şekil 4.1. Lazerle kesim işlemi yapılan 1 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)

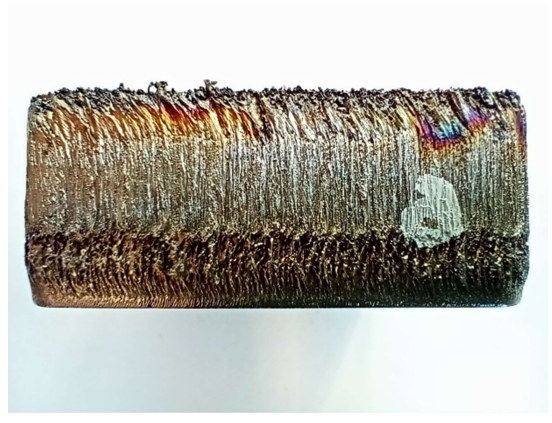


c)

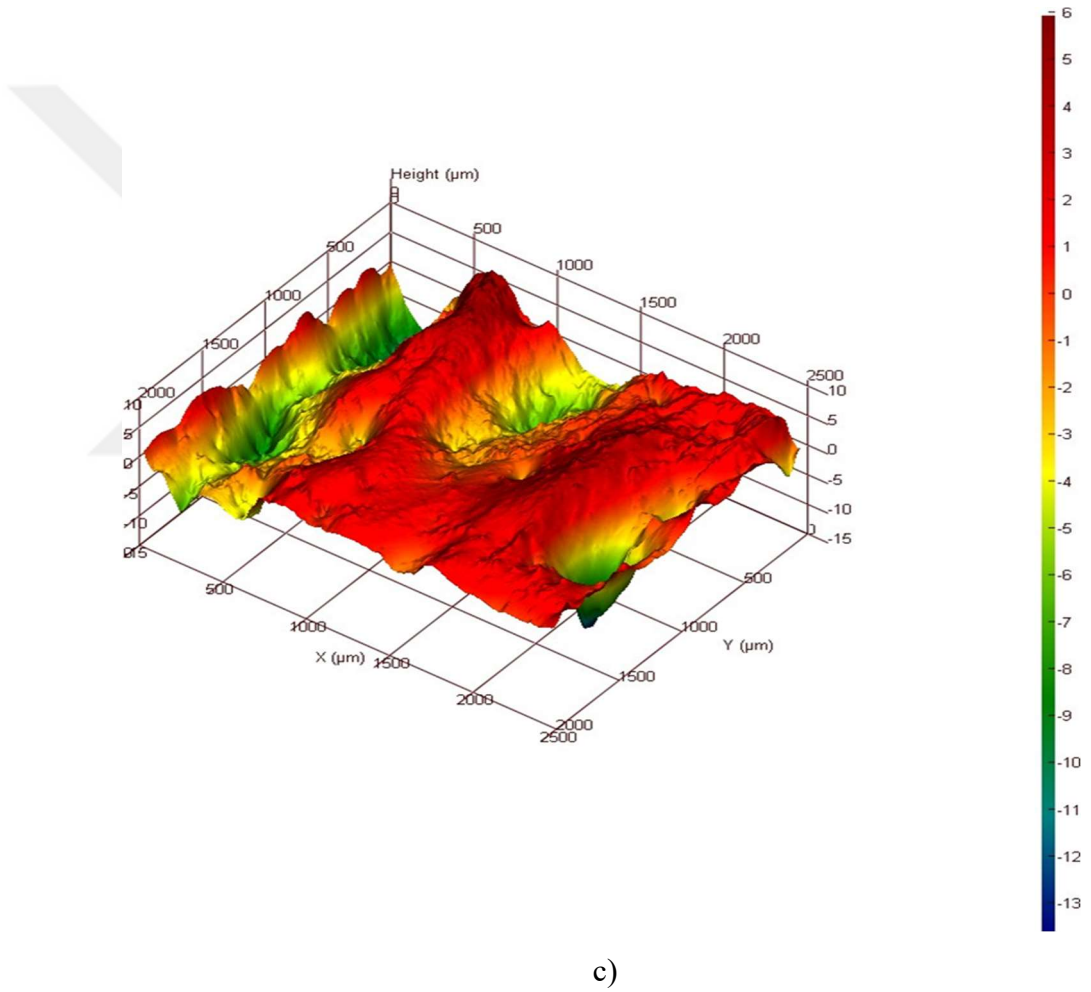
Şekil 4.2. Lazerle kesim işlemi yapılan 2 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

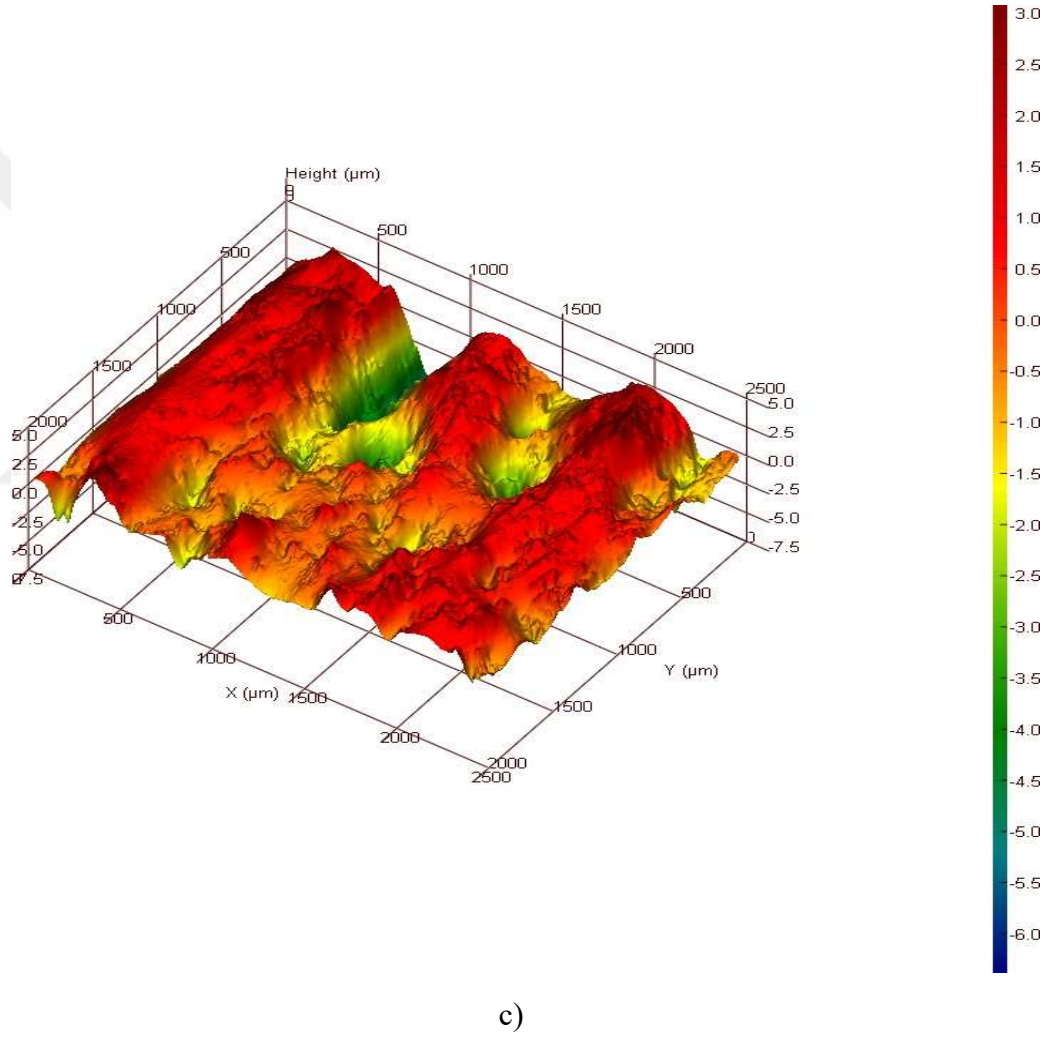
Şekil 4.3. Lazerle kesim işlemi yapılan 3 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

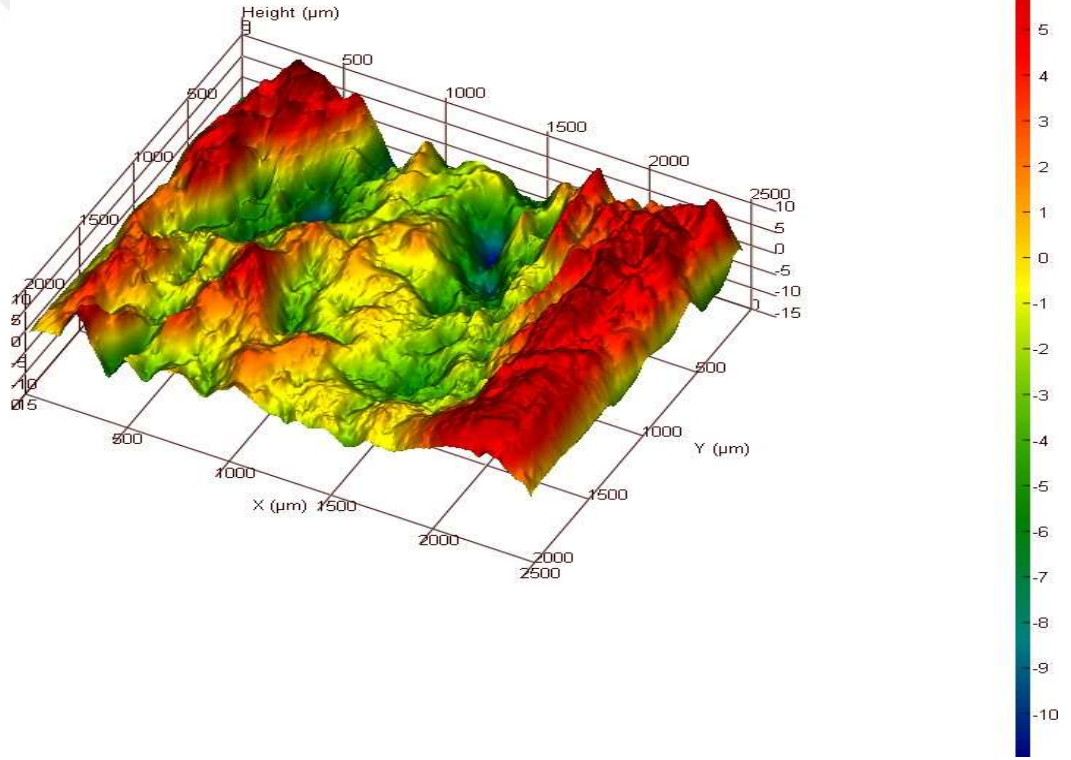
Şekil 4.4. Lazerle kesim işlemi yapılan 4 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

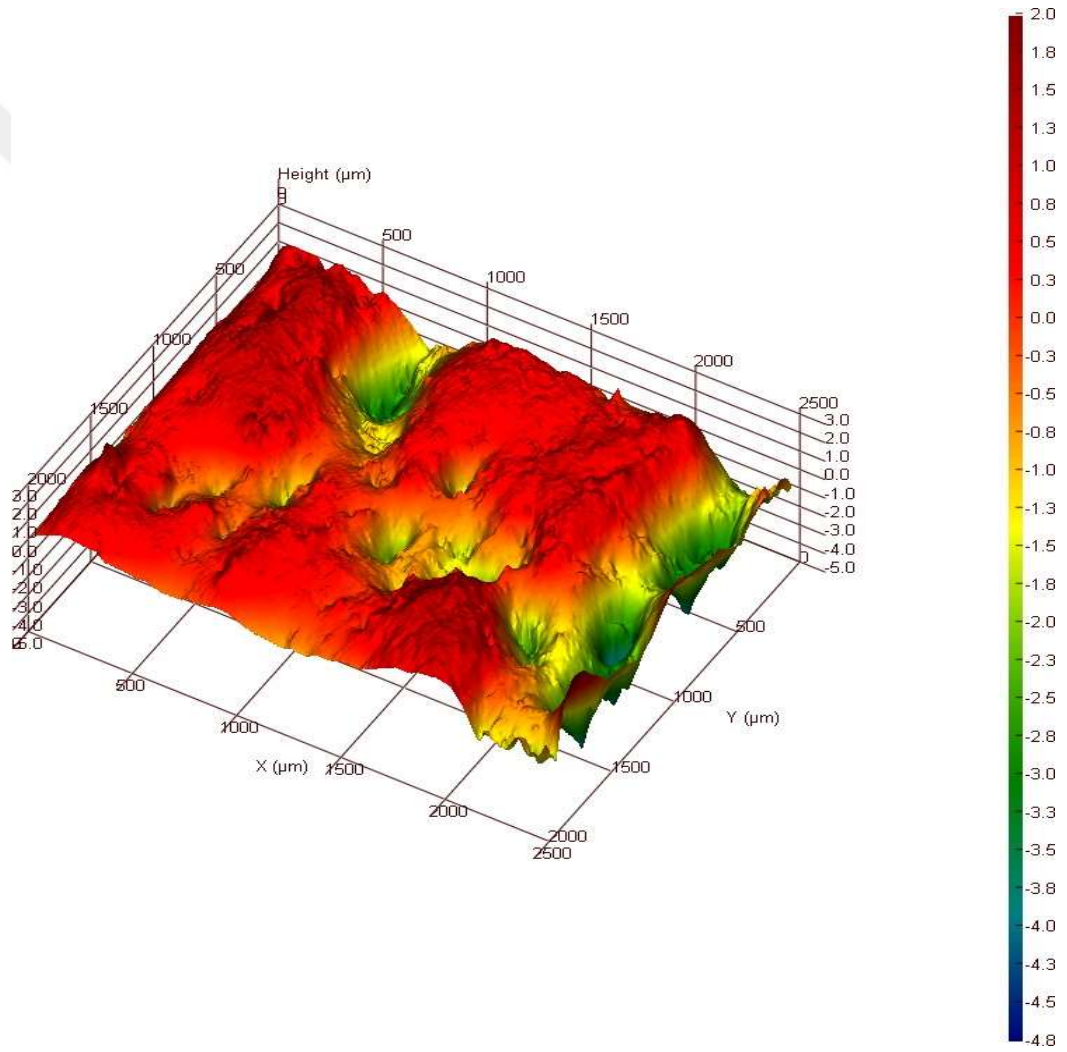
Şekil 4.5. Lazerle kesim işlemi yapılan 5 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)

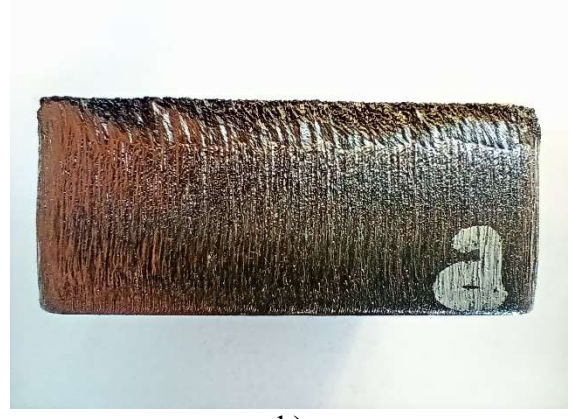


c)

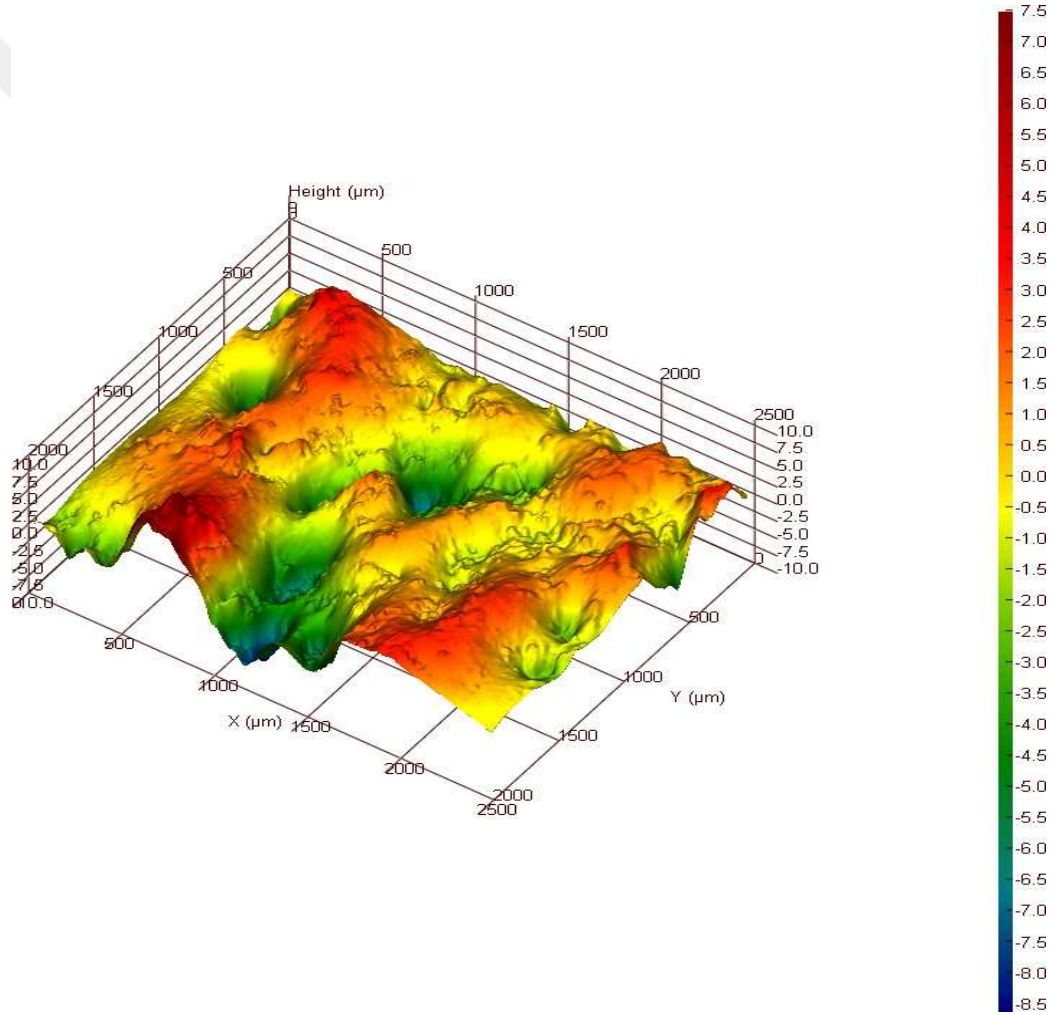
Şekil 4.6. Lazerle kesim işlemi yapılan 6 No’lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

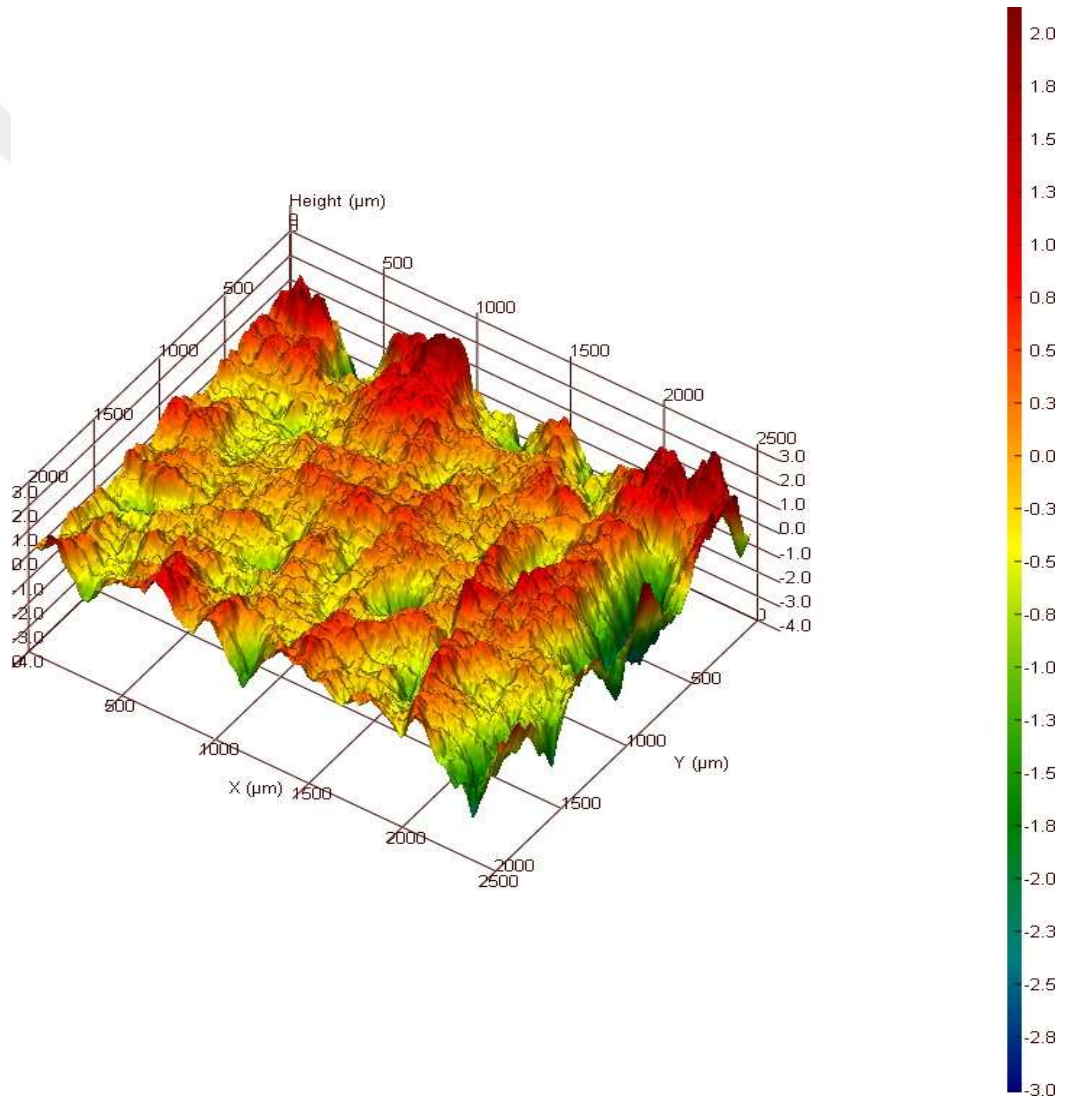
Şekil 4.7. Lazerle kesim işlemi yapılan 7 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

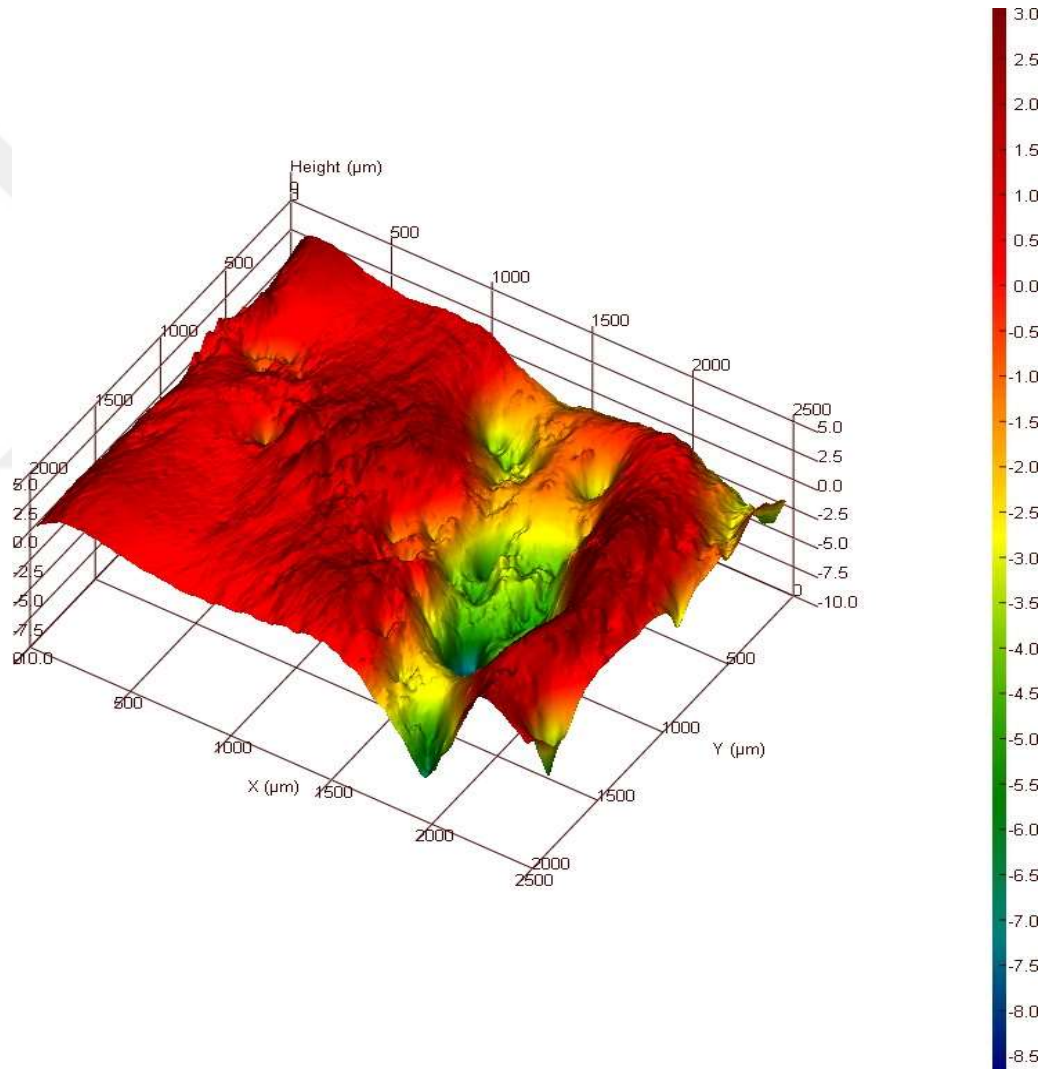
Şekil 4.8. Lazerle kesim işlemi yapılan 8 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

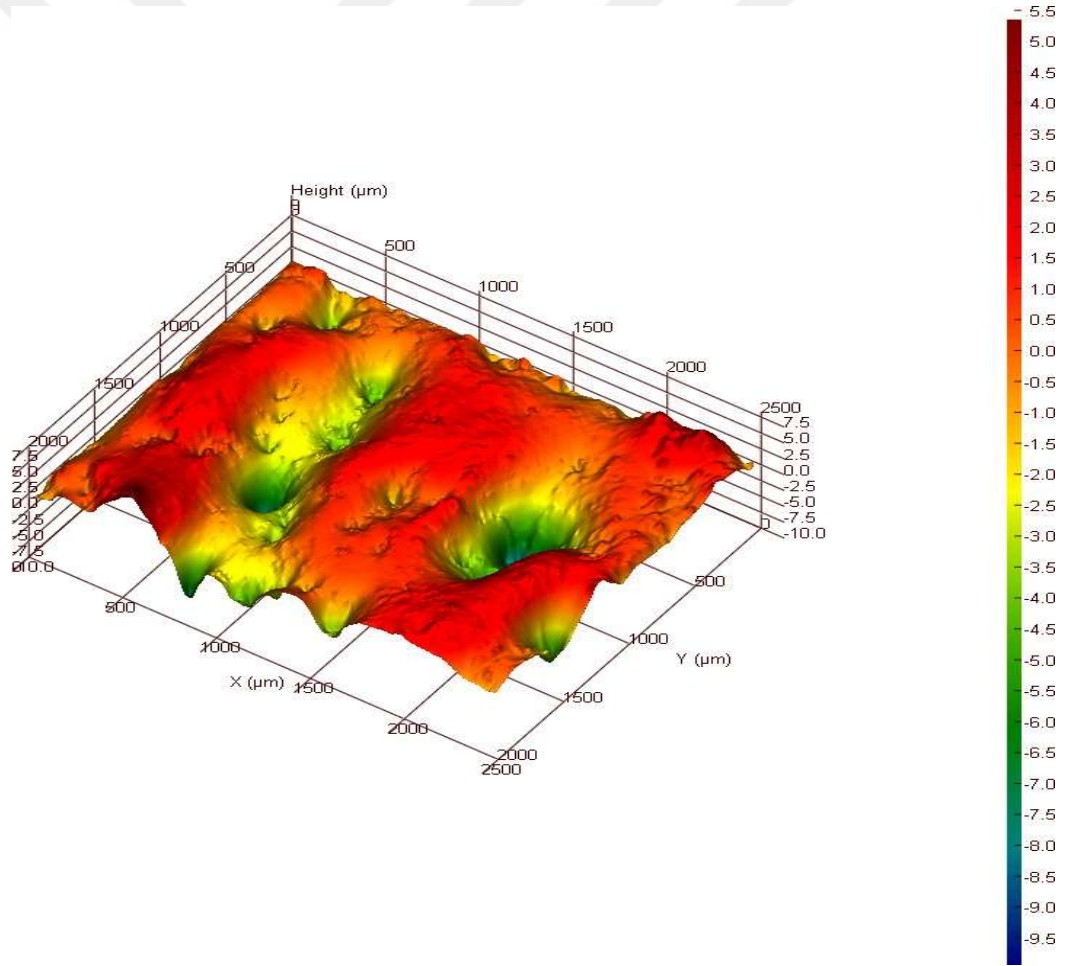
Şekil 4.9. Lazerle kesim işlemi yapılan 9 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

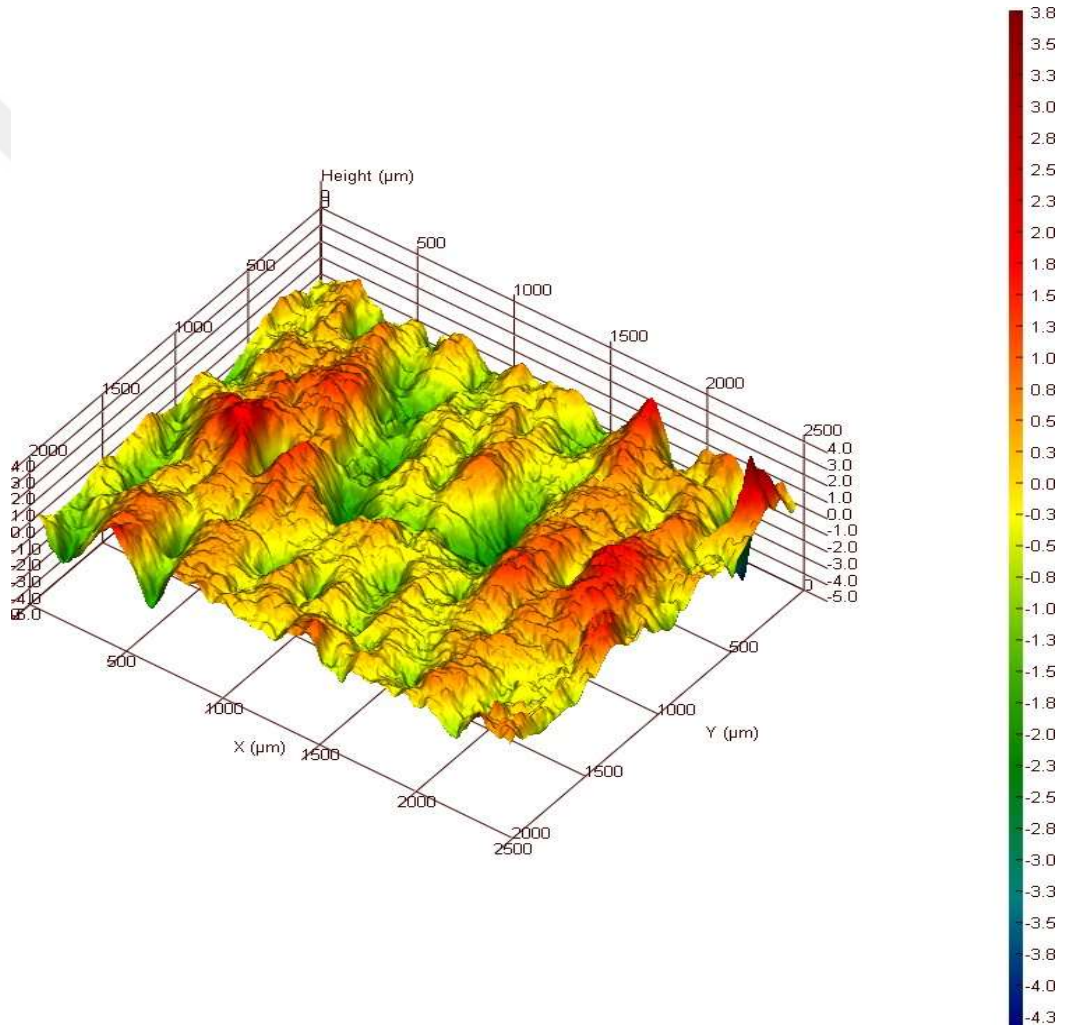
Şekil 4.10. Lazerle kesim işlemi yapılan 10 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

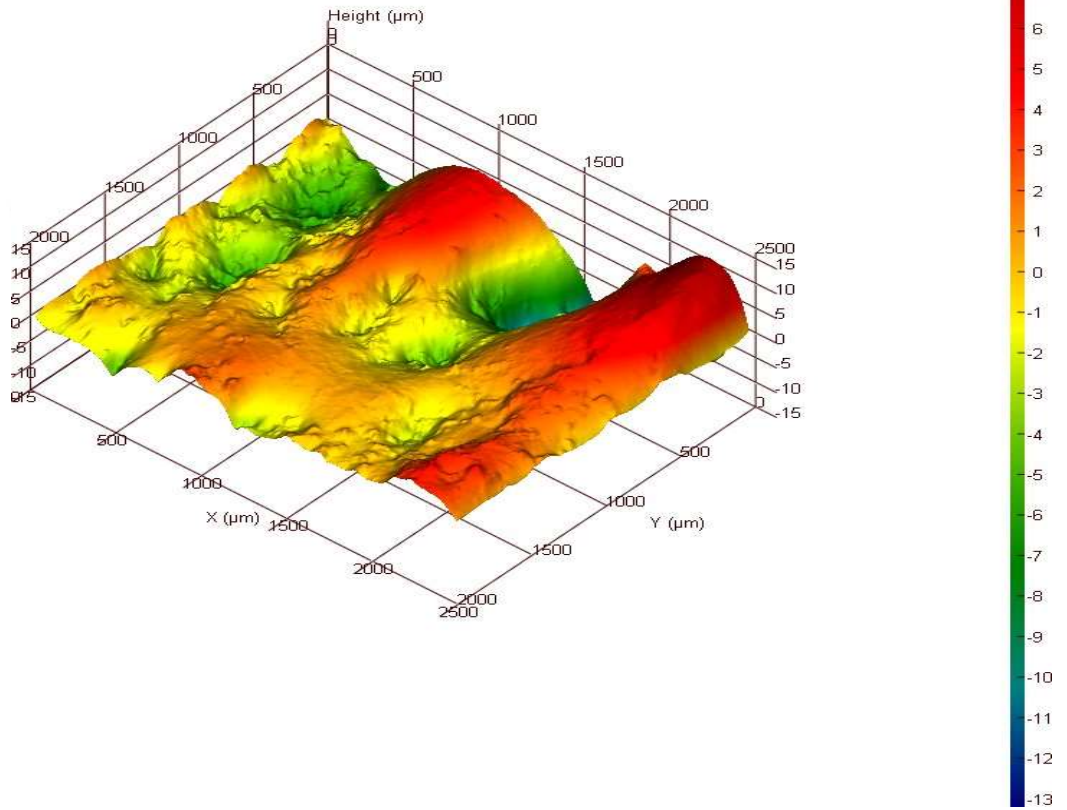
Şekil 4.11. Lazerle kesim işlemi yapılan 11 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)

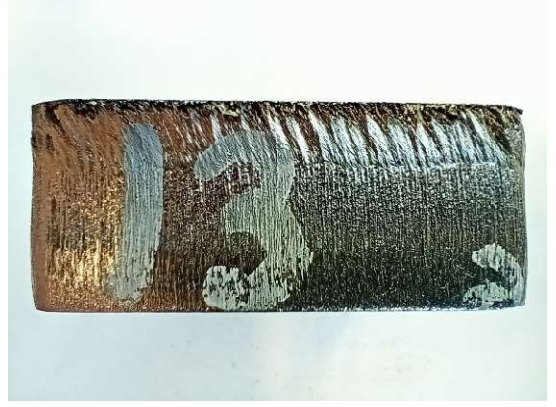


c)

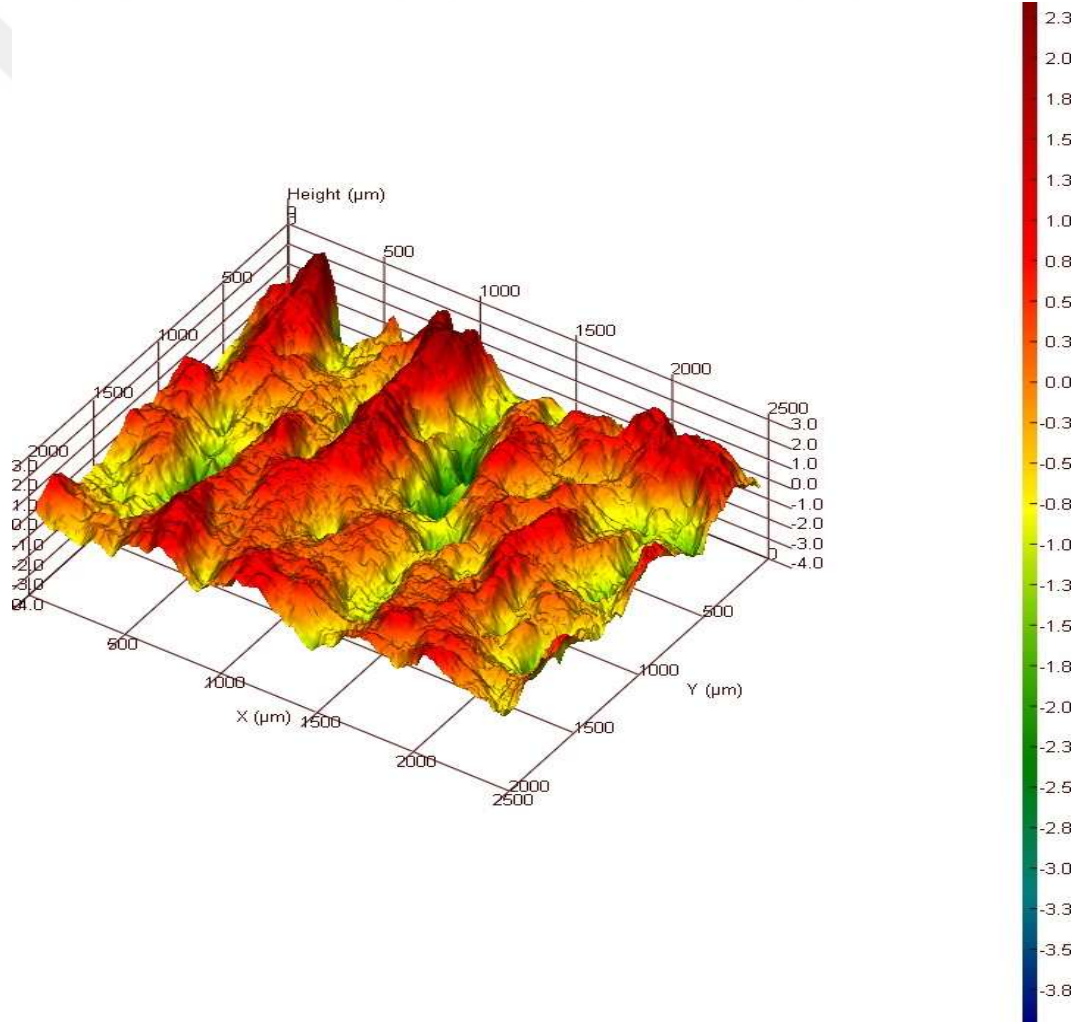
Şekil 4.12. Lazerle kesim işlemi yapılan 12 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

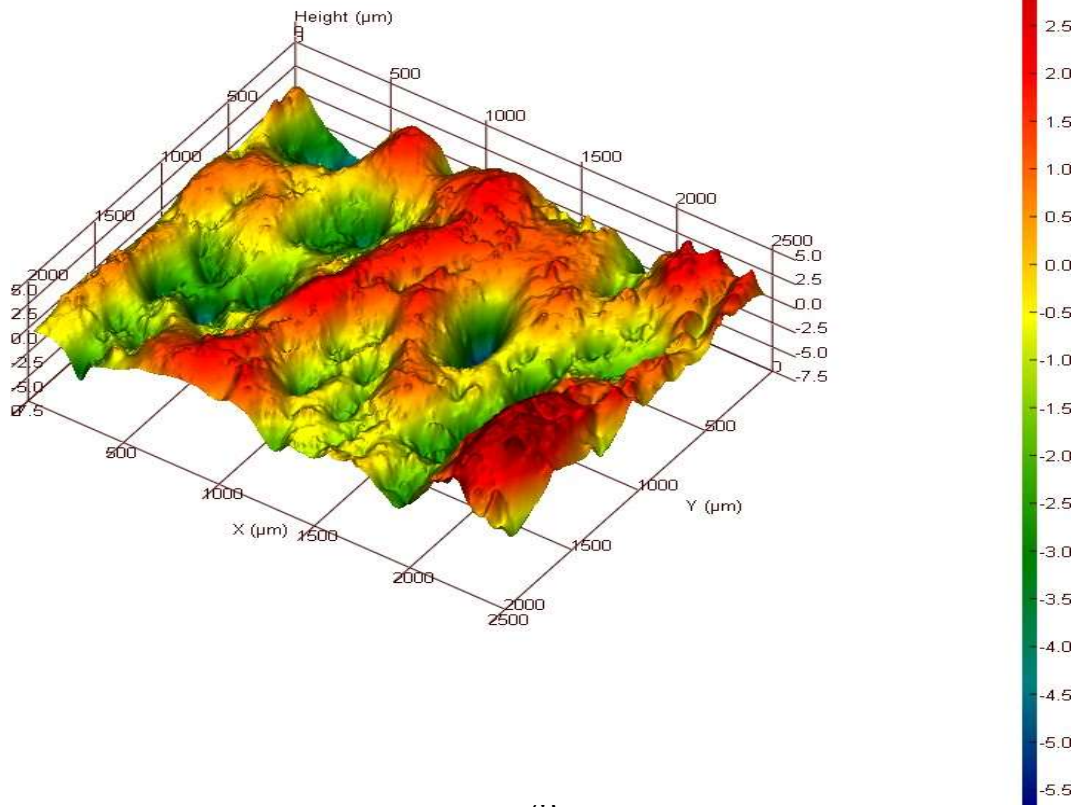
Şekil 4.13. Lazerle kesim işlemi yapılan 13 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

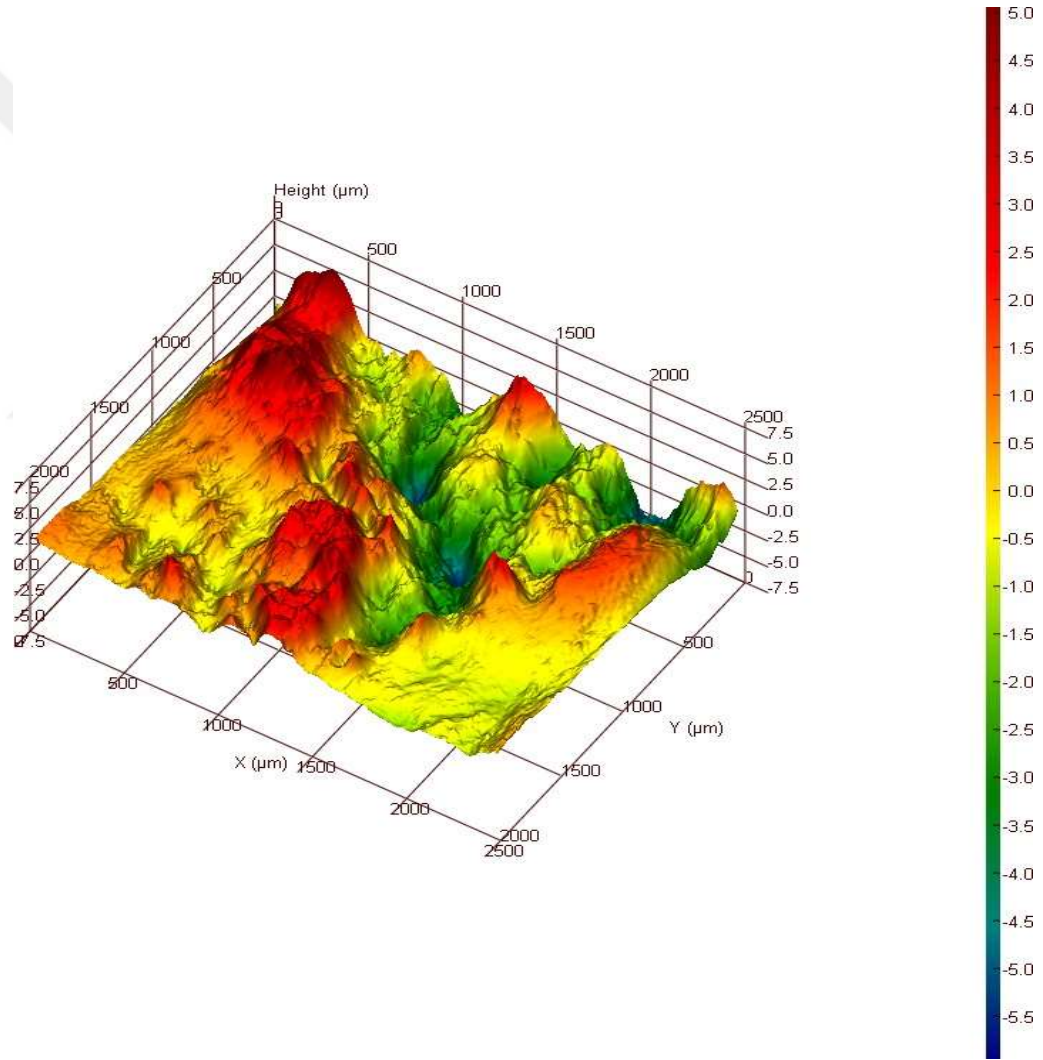
Şekil 4.14. Lazerle kesim işlemi yapılan 14 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



c)

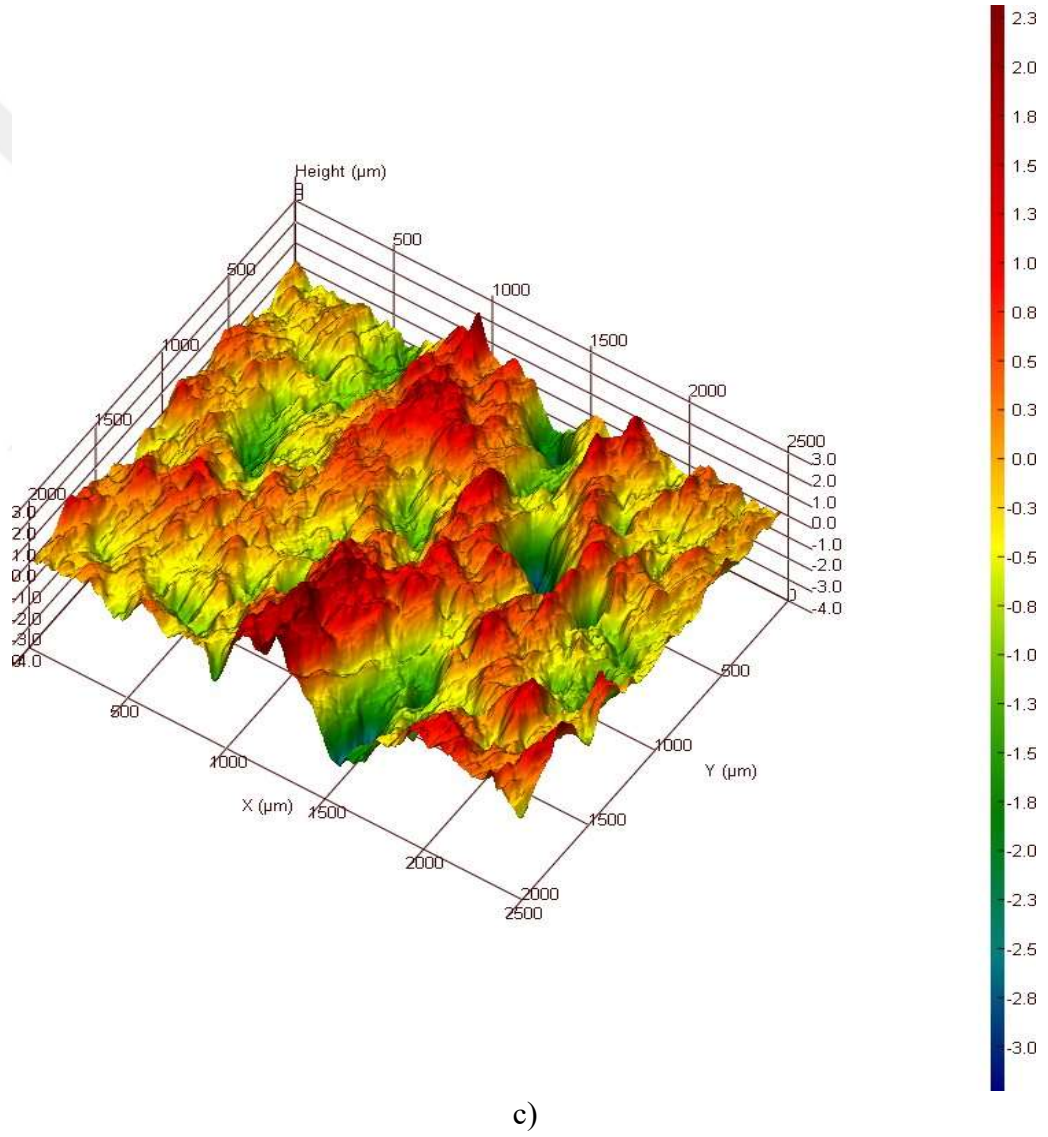
Şekil 4.15. Lazerle kesim işlemi yapılan 15 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası



a)



b)



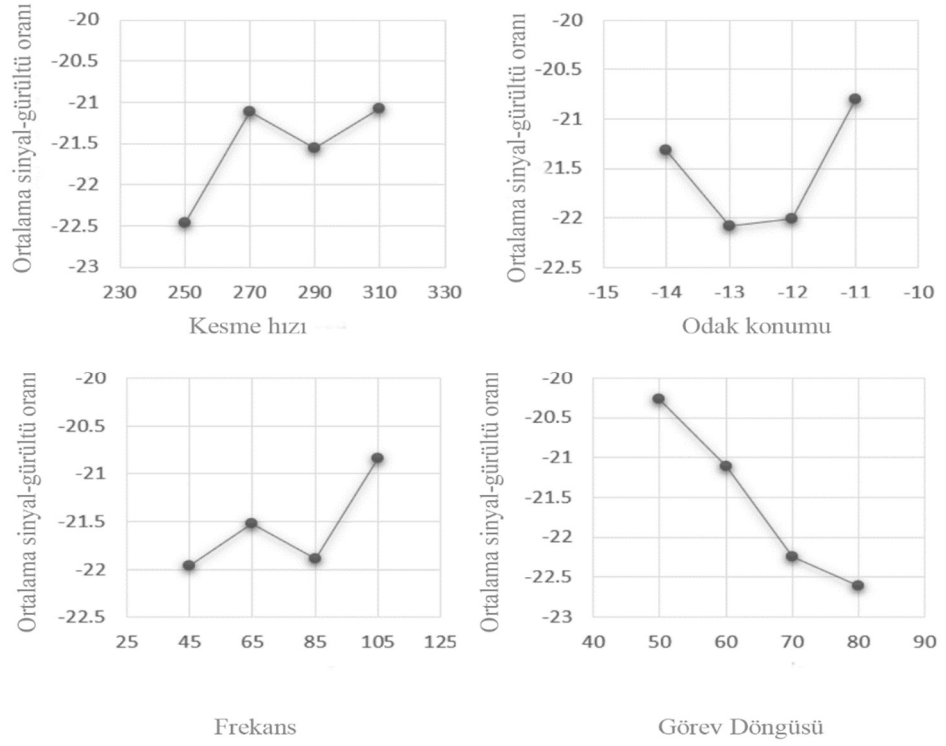
c)

Şekil 4.16. Lazerle kesim işlemi yapılan 16 No'lu numunenin a) Üstten görünüşü b) Yandan görünüşü c) Profilometre ile ölçülen 3D Topolojik Haritası

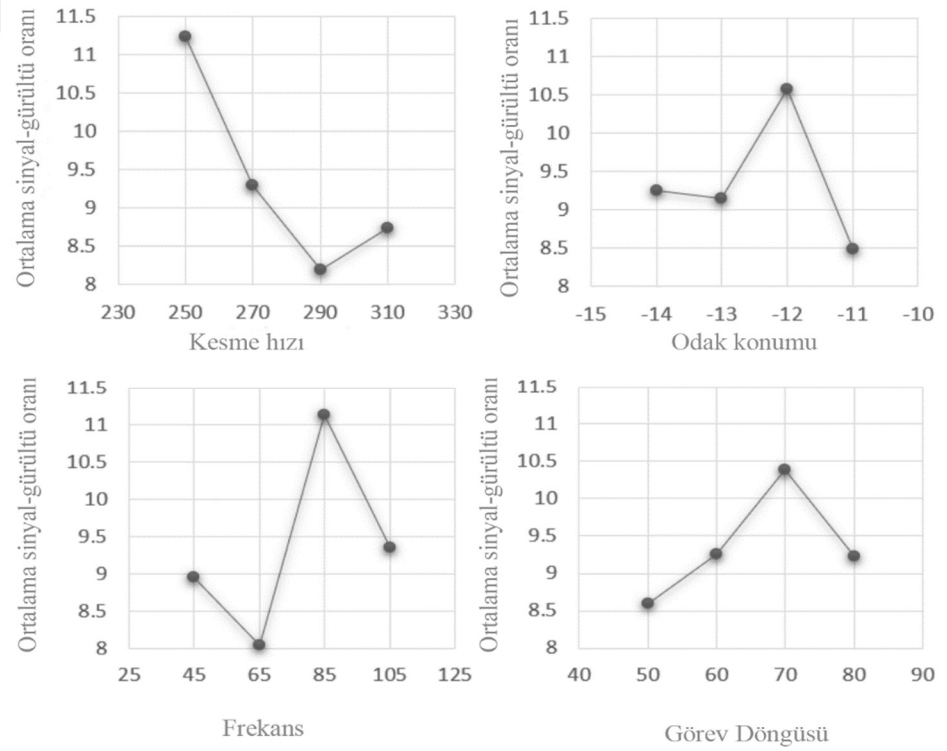
Bu araştırmada, öncelikle kesme işlemi parametrelerinin her yanıt için ayrı ayrı etkisini bulmak için Taguchi Yöntemi uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için gerekli olan deneysel veriler, kesme prosesi parametrelerinin kombinasyonu kullanılarak L16 ortogonal dizisi yardımıyla elde edilmiştir. S/N oranları ve yanıtlar Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Her bir faktörün yanıtlar üzerindeki etkisini gösteren Maks ve Min S/N Oranları arasındaki farkın, kesim proses parametreleri ile olan ilişkisi Şekil 4.17 ve Şekil 4.18' de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Tasarım parametreleri deney sonuçları & Etkiler & S/N Oranları

Deney No.	Değişkenler				Etkiler		S/N Oranları	
	CS (mm/min)	FP (mm)	F (Hz)	DC (%)	SR (µm)	KW (mm)	SR (µm)	KW (mm)
1	250	-11	45	50	11,20	0,38	-20,987	8,404
2	250	-12	65	60	13,55	0,33	-22,637	9,629
3	250	-13	85	70	14,53	0,15	-23,245	16,47
4	250	-14	105	80	14,09	0,30	-22,976	10,45
5	270	-11	65	70	11,78	0,35	-21,424	9,118
6	270	-12	45	80	12,97	0,33	-22,261	9,762
7	270	-13	105	50	9,80	0,33	-19,825	9,762
8	270	-14	85	60	11,15	0,38	-20,945	8,519
9	290	-11	85	80	13,16	0,33	-22,386	9,762
10	290	-12	105	70	12,82	0,42	-22,157	7,432
11	290	-13	45	60	13,26	0,35	-22,450	9,118
12	290	-14	65	50	9,13	0,48	-19,211	6,466
13	310	-11	105	60	8,31	0,33	-18,387	9,762
14	310	-12	85	50	11,22	0,32	-20,998	9,762
15	310	-13	65	80	13,82	0,45	-22,808	6,935
16	310	-14	45	70	12,79	0,38	-22,138	8,519



Şekil 4.17. S/N oranına göre hazırlanmış faktör etkilerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi



Şekil 4.18. S/N oranına göre hazırlanmış faktör etkilerinin kerf genişliğine etkisinin grafiksel gösterimi

Her bir kesim prosesi değişkeninin kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki faktör etki oranlarını bulabilmek için Varyans Analizi (ANOVA) yöntemi uygulanmıştır. ANOVA sonuçlarından da görüldüğü üzere DC ve F sırasıyla SR ve KW üzerinde en etkili proses parametreleri olarak ortaya çıkmaktadır.

ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre SR için önem sırası $DC > CS > FP > F$ olurken, KW için önem sırası ise $F > CS > FP > DC$ şeklinde sıralanmıştır.

ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre KW üzerindeki en etkili süreç parametresi %31,2 ile Frekans olmuştur. DC, %49,01 oranı ile SR üzerinde en önemli proses parametresi olarak bulunmuştur (Çizelge 4.2).

Sonuçlar değerlendirildiğinde, ANOVA ve Taguchi yöntemleriyle elde edilen eğilimlerin her etki için tamamen aynı olduğu kolayca görülebilmektedir.

S/N oranlarına göre minimum yüzey pürüzlülüğü elde edebilmek için optimum proses parametreleri değerlendirildiğinde; kesme hızı 310 mm/dk, odak konumu -11 mm, frekans 105 Hz ve görev çevrimi %50 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.17).

Kerf genişliği için optimum işlem parametreleri ise 250 mm/dk kesme hızı, -12 mm odak konumu, 85 Hz frekans ve %70 görev döngüsü olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar ise Şekil 4.18' de görülmektedir.

Sonuçlara göre minimum yüzey pürüzlülüğü en düşük görev çevriminde (%50) ve minimum çentik genişliği de 85 Hz frekansında elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Etki oranları & Yüzey pürüzlülüğü ve Kerf genişliği üzerine ANOVA sonuçları

	Yüzey Pürüzlülüğü					
	DoF	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Contr. (%)
CS	3	9,271	3,090	2,19	0,268	18,46
FP	3	7,705	2,568	1,82	0,317	15,34
F	3	4,396	1,465	1,04	0,488	8,75
DC	3	24,609	8,203	5,82	0,091	49,01
Error	3	4,231	1,410			8,43
	Kerf Genişliği					
	DoF	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Contr. (%)
CS	3	0,0236	0,0078	1,24	0,432	29,1
FP	3	0,0079	0,0026	0,42	0,755	9,74
F	3	0,0253	0,0078	1,24	0,433	31,2
DC	3	0,0053	0,0017	0,28	0,838	6,54
Error	3	0,0190	0,0063			23,43

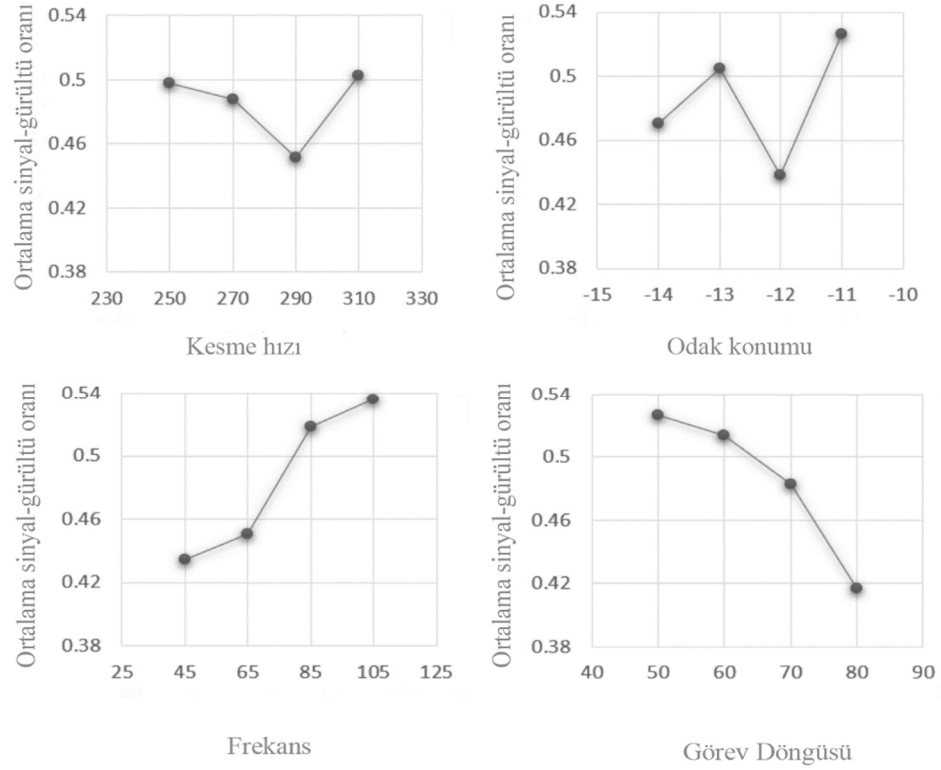
Minimum SR ve minimum KW elde edebilmek için Taguchi ve ANOVA analiz sonuçları bize optimizasyon için dört farklı işlem parametresi kombinasyonunun bulunduğunu ortaya koymaktadır. Ancak kaliteli bir kesim elde edebilmek için bu parametreler bir araya getirilmektedir.

Tek bir fonksiyon kullanarak yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerlerini optimize edebilmek için GRA Metodunu kullanmak önem arz etmektedir. Yüzey pürüzlülüğüne (GRCSR) ve Kerf Genişliğine (GRCKW) ait GRC değerleri Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Bu çalışmada, elde edilen GRG değerleri yardımıyla her bir faktör düzeyi için etki grafikleri oluşturulmuştur. En büyük GRG değeri, Çizelge 4.3'te gösterildiği gibi CS4, FP1, F4 ve DC1'in kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bu nedenle 5. Deneyde (CS4FP1F4DC1); 310 mm/dk CS, -11 mm FP, 105 Hz F ve %50 DC ile lazer kesim işleminin optimum parametre kombinasyonu olarak elde edilmiştir (Şekil 4.19).

Çizelge 4.3. Gri ilişki analiz sonuçları

Exp. No	GRC _{SR}	GRC _{KW}	GRG	RANK
1	0,518	0,414	0,466	7
2	0,373	0,474	0,423	12
3	0,333	1,000	0,667	2
4	0,350	0,520	0,435	11
5	0,472	0,448	0,460	8
6	0,400	0,481	0,441	9
7	0,676	0,481	0,579	3
8	0,523	0,419	0,471	6
9	0,391	0,481	0,436	10
10	0,408	0,371	0,390	15
11	0,386	0,448	0,417	13
12	0,791	0,333	0,562	4
13	1,000	0,481	0,742	1
14	0,517	0,481	0,499	5
15	0,361	0,351	0,356	16
16	0,410	0,419	0,415	14



Şekil 4.19. Faktörlerin Gri İlişki Etkileşimi Grafiği

Her değişkenin çoklu yanıtlara olan etkisinin dağılımını bulabilmek için ANOVA analiz yöntemi uygulanmıştır. Çizelge 4.4'te Frekans (F) parametresinin %18,55'lik etki ile çoklu yanıtlar üzerinde en önemli değişken olduğu gösterilmektedir. Görev Döngüsü (DC) ve Odak Konumu (FP), sırasıyla ikinci (2.) ve üçüncü (3.) önemli işlem parametreleridir. Son olarak, ANOVA ve GRG' den elde edilen sonuçların birbirini doğruladığını açıkça vurgulayabiliriz.

Çizelge 4.4. ANOVA tarafından elde edilen gri ilişki seviyeleri (GRG) sonuçları

Değişkenler	DOF	Adj SS	Adj MS	F-value	p-value	Contr. (%)
CS	3	0,00651	0,00217	0,08	0,965	4,05
FP	3	0,01781	0,00593	0,23	0,872	11,08
F	3	0,02983	0,00994	0,38	0,775	18,55
DC	3	0,02861	0,00953	0,37	0,784	17,79
Residual error	3	0,07802	0,026008			48,53
Total	15	0,16078				

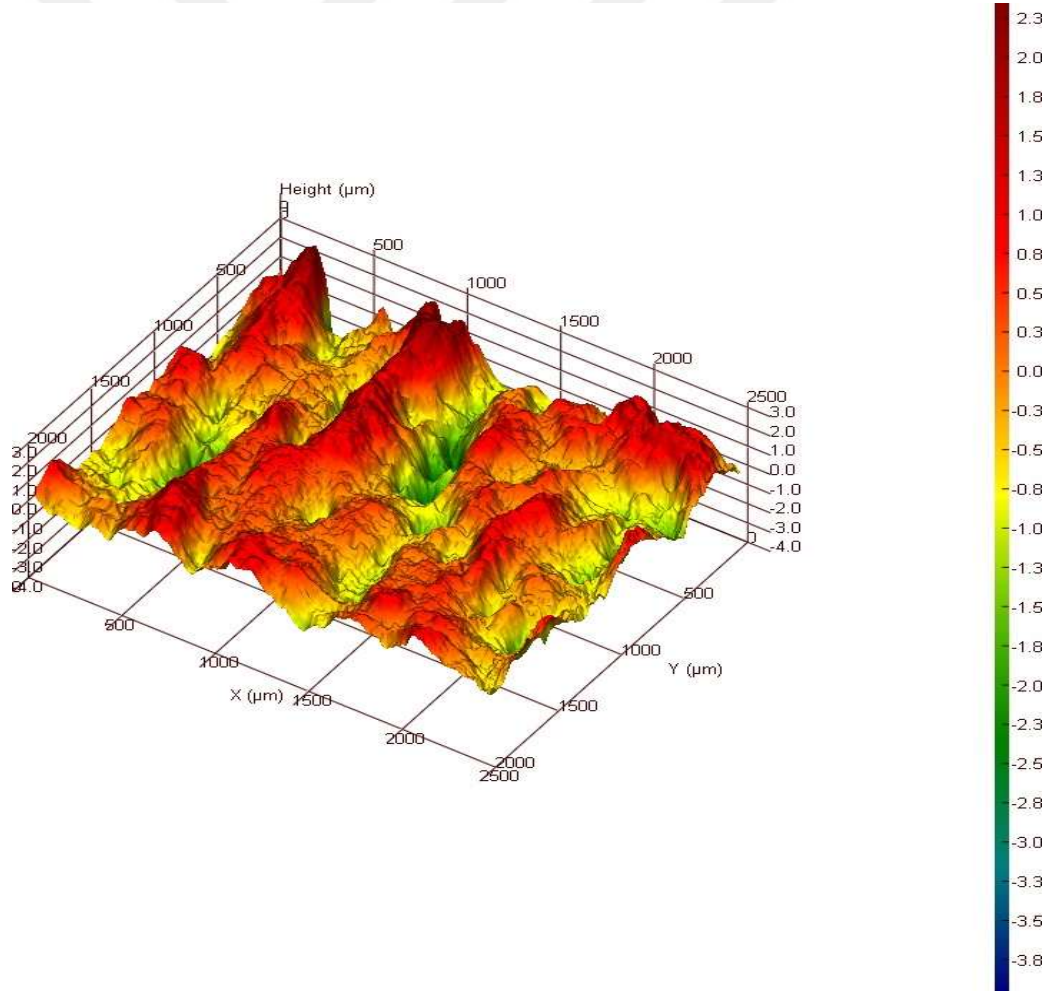
GRG değerlerine göre kesim yüzeyi morfolojisi dikkatlice incelenmiştir. Ayrıca ortalama GRG değerleri ile uyumlu olarak kesilmiş numunelere ait en yüksek, en düşük ve ortalama GRG değerleri kullanılarak 3D optik profilometre sayesinde yüzeylere ait haritalar elde edilmiştir. Kesim işlemi sonrası elde edilen 16 adet numuneye ait yüzey topolojik haritaları Şekil 4.1'den Şekil 4.16'ya kadar gösterilmiştir. Görüntülerde yüksekliğin sıfır olduğu bölgeler sarı tonlardaki renklerle ifade edilmiştir. Kırmızı renk ile pozitif yükseklik, yeşil renk ile negatif derinlik artmaktadır.

Ortalama Yüzey Pürüzlülük değerlerini tanımlamak için optik profilometreden sayısal değerler elde edilmiştir. ISO 25 ve ISO 178 standartlarına göre ölçümler ve testler gerçekleştirilmiştir. Aritmetik Ortalama Yükseklik (Sa), ortalama düzlemden mutlak yüksekliği temsil etmektedir. Sa Denklem 4.1' e göre hesaplanmıştır. "A" Birim Alanı, "Z" Yüksekliği, "x" ve "y" ölçüm koordinatlarını temsil etmektedir.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x,y)| dx dy \quad (4.1)$$

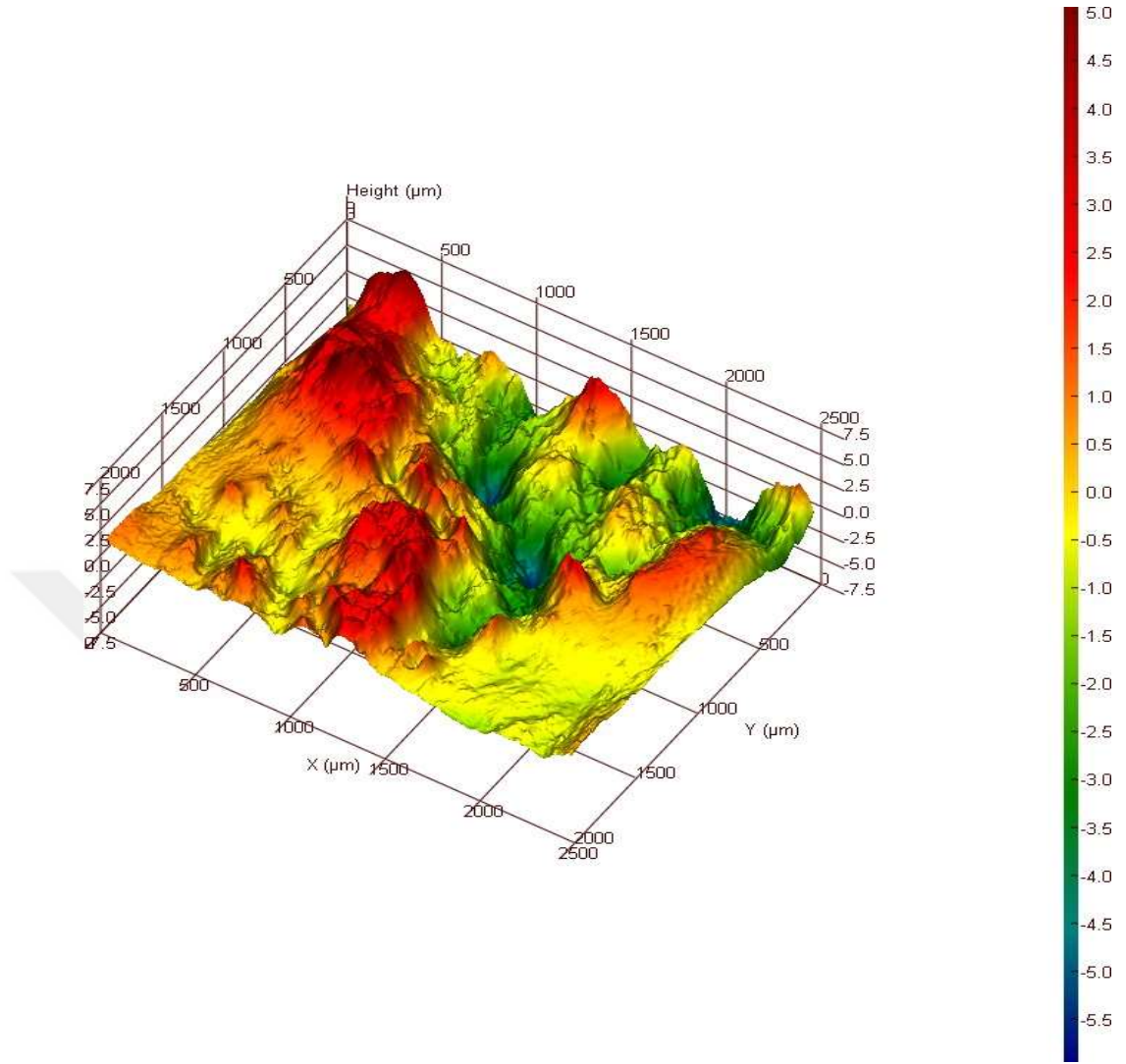
Elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek GRG değerine sahip numunenin Sa değerinin $0,531 \mu\text{m}$ ile en düşük sonucu verdiği görülmüştür. Yüzey topografyası incelendiğinde diğer numunelere göre daha düzgün bir topografya elde edilmiştir. Ortalama GRG değerine sahip numunenin Sa değeri ise $0,622 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. En düşük GRG değerine sahip numunenin Sa değeri ise $0,961 \mu\text{m}$ olarak gözlenmiştir. Ortalama GRG değeri olan numunenin yüzey topografyasındaki kırmızı renk yoğunluğu ölçüm skalasından kaynaklanmaktadır.

Kesilen numunelere ait en yüksek, en düşük ve ortalama GRG değerlerine sahip numunelerin kesim yüzey görüntüleri Şekil 4.20' de verilmiştir. Bu numunelerin kesim yüzey görünüşleri de Şekil 4.21 'de gösterilmiştir.



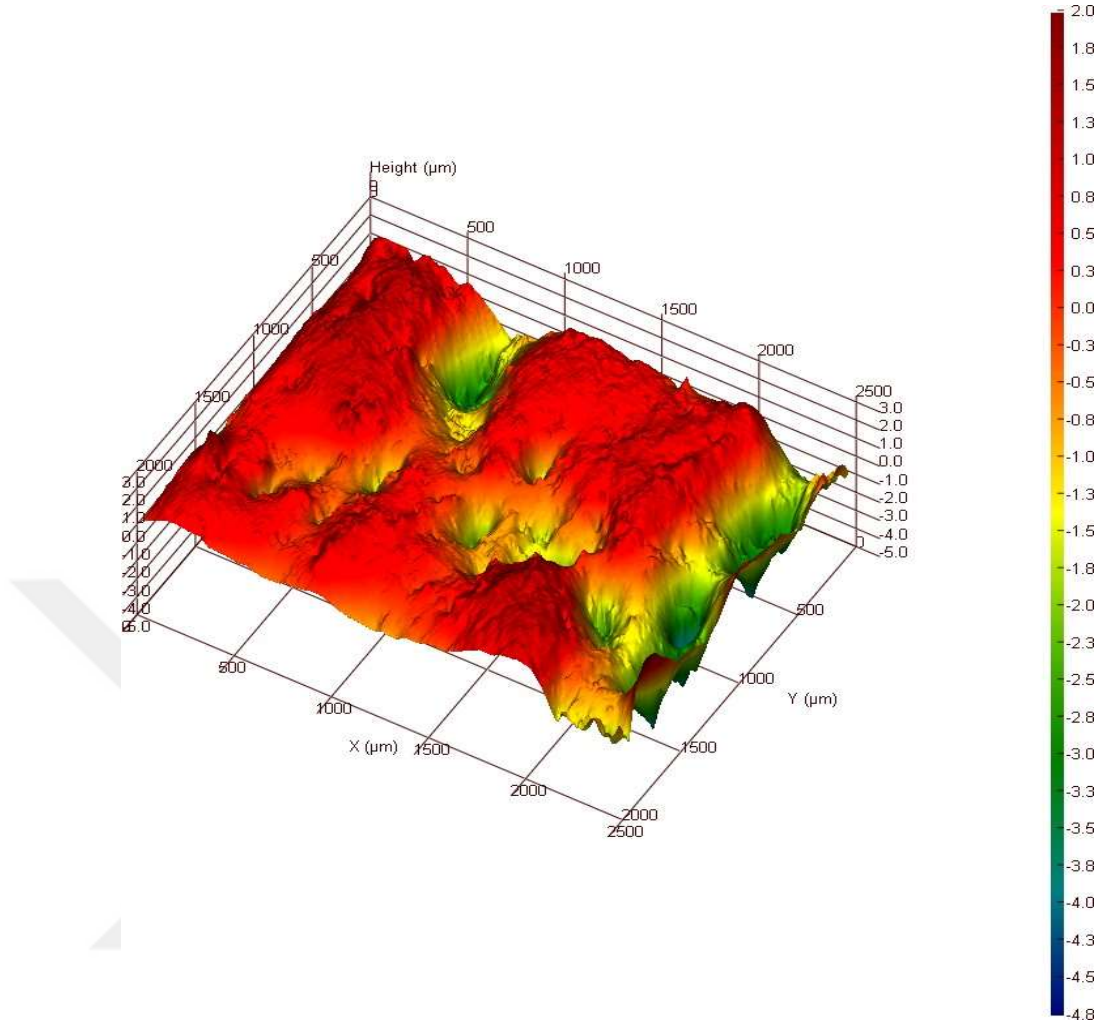
a)

Şekil 4.20. Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6 (devam)



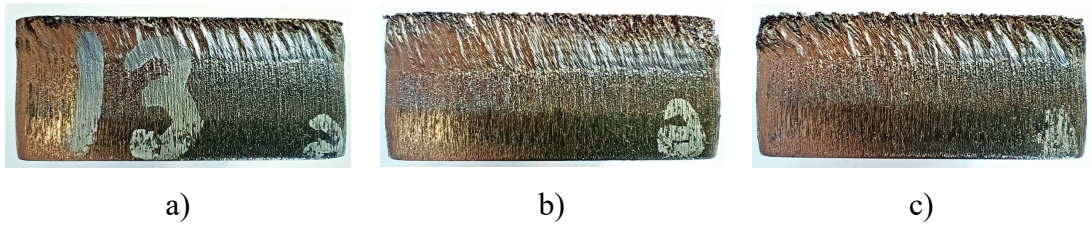
b)

Şekil 4.20. Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6 (devam)



c)

Şekil 4.20. Yüzey Topoğrafyası a) Numune-13, b) Numune-15 c) Numune-6



a)

b)

c)

Şekil 4.21. Kesim Yüzeyi Görüntüleri (a) Numune-13, (b) Numune-15 (c) Numune-6

5. SONUÇ

Bu araştırmanın amacı, fiber lazer tezgahında 20 mm kalınlığında AISI 304 (DIN EN 1.4301) kalite paslanmaz çelik malzemenin kesilmesinde optimum işlem parametrelerini (kesme hızı, odak konumu, frekans ve görev döngüsü) bulmaktır.

Bu çalışmada, Taguchi deneysel tasarım yöntemi kullanılarak oluşturulan deney tablosuna göre gerçekleştirilen deneyler ile yüzey pürüzlülük değerleri ve kerf genişlikleri ölçülmüştür.

Taguchi Yöntemi kullanılarak minimum Yüzey Pürüzlülüğü (SR) ve minimum Kerf Genişliği (KW) için optimum parametre kombinasyon sonuçları sırasıyla CS4FP1F4DC1 ve CS1FP3F3DC3 elde edilmiştir. Ayrıca ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü için önem sırası $DC > CS > FP > F$; Kerf genişliği için ise $F > CS > FP > DC$ olarak listelenmiştir.

Ayrıca hem yüzey pürüzlülüğü hem de kerf genişliği dikkate alındığında, çoklu yanıt fonksiyonları üzerindeki etki oranlarının değerleri ve optimum kesim değişkenleri seviyesi kombinasyonları GRA yöntemi ile elde edilmiştir.

Tüm durumlar incelendiğinde, Deney 13 (CS4FP1F4DC1) maksimum çoklu performans karakteristiklerini ortaya koymaktadır. En yüksek GRG değeri bu kombinasyonla elde edilmiş olup, Yüzey Pürüzlülüğü (SR) ve Kerf Genişliği (KW) değerleri sırasıyla 8,31 μm ve 0,33 mm olarak tespit edilmiştir.

Her parametrenin çoklu etkilere olan dağılımını tespit edebilmek amacıyla ANOVA analiz yöntemi uygulanmıştır. Frekans (F) parametresinin %18,55'lik etki ile çoklu etkiler üzerinde en önemli değişken olduğu bulunmuştur. Görev Döngüsü (DC) ve Odak Konumu (FP) sırasıyla ikinci ve üçüncü etkili parametreler olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca ANOVA ile elde edilen sonuçlara göre kerf genişliği üzerinde en etkili proses parametresinin %31,2 oranı ile frekans olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ise %49,01 etki oranı Görev döngüsü (Duty Cycle)

olduğu bulunmuştur. Ayrıca en yüksek, ortalama ve en düşük GRG değęlerine sahip Sa değęlerinin sırasıyla 0,531 µm, 0,622 µm ve 0,961 µm olduğu gözlenmiştir.

20 mm kalınlığındaki AISI 304 (DIN EN 1.4301) malzemenin fiber lazer kesiminde minimum yüzey pürüzlülüğü ve minimum kerf genişliğini elde edebilmek için optimum parametrelerin kesme hızı için 310 mm/dk, odak konumu için -11 mm, Frekans için 105 Hz ve görev döngüsü için %60 olduğu belirlenmiştir.



KAYNAKLAR

- Amaral I, Silva FJG, Pinto GFL, Campilho RDSG, Gouveia RM. Improving the cut surface quality by optimizing parameters in the fiber laser cutting process. *Procedia Manuf* 2019;38:1111–20. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.199> .
- Andersson N., Granberg C. (2015). Laser Cutting in Ti-6Al-4V Sheet: Doe and Evaluation of Process Parameters Informative, Master Degree Thesis, Chalmers University of Technology Department of Materials and Manufacturing Technology, Gothenburg, 15-19.
- Anković P, Madić M, Radovanović M, Petković D, Mladenović S. Optimization of Surface Roughness from Different Aspects in High-Power CO₂ Laser Cutting of AA5754 Aluminum Alloy. *Arab J Sci Eng* 2019;44:10245–56. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04037-9> .
- Anonim, 2023. <https://www.ceyrekmuhendis.com/elektromanyetik-spektrum/> – (Erişim Tarihi: 07.01.2023).
- Arcan A. (2011). Lazer Işını ile Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 8-15.
- Arteaga F. (2022) CO₂ vs. Fiber Laser Technology: Which is right for you?, <https://bystronic.com/usa/en-us/news/130204-co2-vs-fiber-laser>
- Aydın, T. (2002). Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Gazlar ve Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 20-75.
- Berkmanns, J. (2008) “Laser cutting. LASERLINE technical.” Linde Gas LLC, Germany, 20
- Bernat, R., Zalezak, Z., Zarnovsky, J., Kescskes, N., (2018). Monitoring The Quality of Laser Cutting. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 137-145.
- Biçer, N. (2020). Gövde Borulu Isı Değiştiricilerin Yeni Nesil Perdeleri Olarak Optimum Tasarımı, Prototip İmalatı ve Testi (Doktora Tezi). Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Sakarya.
- Böhler (2001). *Gedik Kaynak Teknolojisi*. İstanbul: Gedik Yayınları, 103-111
- Buj-Corral I, Costa-Herrero L, Domínguez-Fernández A. Effect of process parameters on the quality of laser-cut stainless steel thin plates. *Metals (Basel)* 2021;11. <https://doi.org/10.3390/met11081224> .

Caydas U, Hascalik A. Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with mul-ti-performance characteristics, Opt. Laser Technol., 2008, vol. 40, no. 7, pp. 987–994, <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.01.004> .

Chen MF, Sen Ho Y, Hsiao WT, Wu TH, Tseng SF, Huang KC. Optimized laser cutting on light guide plates using grey rela-tional analysis, Opt. Lasers Eng., 2011, vol. 49, no. 2, pp. 222–228, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2010.09.008> .

Cicvilmint, (2023). (<https://civilmint.com/laser-beam-machining/2023>) Erişim tarihi : 08.01.2023

Çavuşoğlu, N. (2011). DC04 kalite çelik ile 6061-T6 alüminyum alaşımı sacların laser bindirme kaynağında kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmenin mekanik ve metalürjik özellikleri üzerine etkisi. *Doktora Tezi*. Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ding H, Wang Z, Guo Y. Multi-objective optimization of fiber laser cutting based on generalized regression neural network and non-dominated sorting genetic algorithm. Infrared Phys Technol 2020;108:103337. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103337>.

Erdoğan Ş. (2007). Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneyisel Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-51.

Fisher, R.A. (1992). On the Mathematical Foundations of Theoretical Statistics. In: Kotz, S., Johnson, N.L. (eds) Breakthroughs in Statistics. Springer Series in Statistics. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0919-5_2

Fomin VM, Golyshev AA, Malikov AG, Orishich AM, Shulyat’ev VB. Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO2 lasers. J Appl Mech Tech Phys 2015;56:726–35. <https://doi.org/10.1134/S0021894415040203> .

Future Market (2023). <https://www.futuremarketinsights.com/reports/fiber-laser-market>

Ghany, K. A., Newishy, M. (2005, October). Cutting of 1,2mm Thick Austenitic Stainless Steel Using Pulsed and CW Nd:YAG Laser. Journal of Materials Processing Technology, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.251>.

Grandview, (2023). <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/laser-processing-market>

Hecht, J., (1992) “Mc Graw Hill”, The Laser Guidebook United States of America 2: 14.

Ion, J. C., (2005). Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), Australia, 576 p.

Irene Buj-Corral, Lluís Costa-Herrero, Alejandro Domínguez-Fernández (2021, October, 103866). Effect of Process Parameters on the Quality of Laser-Cut Stainless Steel Thin Plates MDPI, Metals 2021, 11(8), 1224; <https://doi.org/10.3390/met11081224>

İncel, E. (2016). Deney Tasarımı ve Yapay Sinir Ağları Yöntemleriyle Alüminyum Ekstrüzyon Prosesinin İyileştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Balıkesir.

Jadhav A, Kumar S. Laser cutting of AISI 304 material: an experimental investigation on surface roughness. Adv Mater Process Technol 2019;5:429–37. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2019.1622297> .

Jeffrey Kuo, C., Su, T., Jhang, P., Huang, C. and Chiu, C. (2011). Using the Taguchi method and grey relational analysis to optimize the flat-plate collector process with multiple quality characteristics in solar energy collector manufacturing. Energy, 36, 3554-3562.

Jing Wang, Zhaorui Sun, Lianwang Gu, HamidrezaAzimy (2021, November, 103866). Investigating the effect of laser cutting parameters on the cut quality of Inconel 625 using Response Surface Method (RSM) Elsevier, [Volume 118. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103866](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103866)

Kaluç, E. (2007). Paslanmaz Çelikler, Geliştirilen Yeni Türleri ve Kaynak Edilebilirlikleri. Ankara: TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları,45-94.

Kanbolu, S. (1996). Östenitik Krom Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 35-78.

Kannatey-Asibu, E. (2009). Principles of laser materials processing. A John Wiley & Sons, Inc., Publication.

Karaaslan, A. (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri, *Literatür Yayınları*, 580, İstanbul.

Kaya, Y. (2014). Patlamalı Kaynak Yöntemi İle Üretilen Grade A Gemi Sacı-Paslanmaz Çelik Kompozitlerin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 15-32.

Kellens, K., Rodrigues, G.C., Dewulf, W. ve Duflou, J. (2014). Energy and Resource Efficiency of Laser Cutting Processes. Physics Procedia 56: 854 – 864.

Kotadiya DJ, Pandya DH. Parametric Analysis of Laser Machining with Response Surface Method on SS-304. Procedia Technol 2016;23:376–82. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.040> .

Kotadiya DJ, Kapopara JM, Patel AR, Dalwadi CG, Pandya DH. Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304. Mater Today Proc 2018;5:5384–90. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.124> .

Leadrp (2023). (<https://leadrp.net/blog/a-complete-guide-to-understand-surface-roughness-in-manufacturing/>)

Li M. Evaluation of the effect of process parameters on the cut quality in fiber laser cutting of duplex stainless steel using response surface method (RSM). *Infrared Phys Technol* 2021;118:103896. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103896> .

Liu Y, Zhang S, Zhao Y, Ren Z. Experiments on the kerf quality characteristic of mild steel while cutting with a high-power fiber laser. *Opt Laser Technol* 2022;154:108332. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108332> .

Lopez AB, Assunção E, Quintino L, Blackburn J, Khan A. High-power fiber laser cutting parameter optimization for nuclear Decommissioning. *Nucl Eng Technol* 2017;49:865–72. <https://doi.org/10.1016/j.net.2017.02.004> .

Madic, M. J., and Radovanovic, M. R. (2012, January). Analysis of the Heat Affected Zone in CO₂ Laser Cutting of Stainless Steel. *Thermal Science*, 363-373.

Magdum VB, Kittur JK, Kulkarni SC. Surface roughness optimization in laser machining of stainless steel 304 using response surface methodology. *Mater Today Proc* 2022;59:540–6. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.570> .

Metiner H. (1995). “Lazerin çalışma prensipleri”, Aselsan, Ankara, 1-3, 4-5.

Öner U. (2008). Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Aralığı ve Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 24-25, 38-43, 92-93.

Patel A, Bhavsar SN. (2020). Experimental investigation to optimize laser cutting process parameters for difficult to cut die alloy steel using response surface methodology. *Mater Today Proc* 2020;43:28–35. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.201> .

Patel, J. M., and Patel, D. M. (2011, July). Parametric Investigation in CO₂ Laser Cutting Quality of Hardox-400 Materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5979-5984.

Powell J, Kaplan FH. A technical and commercial comparison of fiber laser and CO₂ laser cutting, *ICALEO* 2012, 277 (2012); <https://doi.org/10.2351/1.5062456> .

Radovanovic, M. and Dasic, P., (2006). Research on surface roughness by laser cut, *The Annals of University "Dunarea Dej" of Galati Fascicle VIII*, ISSN 1241-4590 *Tribology*, 84-88.

Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., and Cheraghi, S. H. (2003, March). CO₂ Laser Cut Quality of 4130 Steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 351-358.

Rajesh K, Murali Krishnam Raju V V., Rajesh S, Sudheer Kumar Varma N. Effect of process parameters on machinability characteristics of CO₂ laser process used for cutting SS-304 stainless steels. *Mater Today Proc* 2019;18:2065–72. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.261> .

Rana RS, Chouksey R, Dhakad KK, Paliwal D. Optimization of process parameter of Laser beam machining of high strength steels: A review. *Mater Today Proc* 2018;5:19191–9. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.274> .

Roy, R.K. (2001). *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*

Sarpkaya, Ç. (2014). Taguchi Metoduna Dayalı Gri İlişkisel Analiz ile Haşıl Prosesinin Optimizasyonu. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Scintilla LD, Tricarico L, Wetzig A, Beyer E. Investigation on disk and CO₂ laser beam fusion cutting differences based on power balance equation. *Int J Mach Tools Manuf* 2013;69:30–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.02.008> .

Senthilkumar V, Adinarayanan A, Jagatheesan K. Grey Relational Analysis (GRA) for optimization of CO₂ laser cutting of stainless steel, *Mater. Today Proc.*, 2022, 2022, in press, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.439> .

Shamlooei M, Zanon G, Valli A, Bison P, Bursi OS. Investigation of thermal behaviour of structural steel S235N under laser cutting process: Experimental, analytical, and numerical studies. *Eng Struct* 2022;269:114754. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114754> .

Son, Seungik & Lee, Dongkyoung (2020, October, 103866). The Effect of Laser Parameters on Cutting Metallic Materials MDPI, *Materials* 2020, 13(20), 4596; <https://doi.org/10.3390/ma13204596>

Soydan, F. (2015). Laser kesim parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Steen, W. ve Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Fourth Edition, Springer, London.

Stelzer S, Mahrle A, Wetzig A, Beyer E. Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO₂ laser beams. *Phys Procedia* 2013;41:399–404. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.093> .

Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K. and Chryssolouris, G., (2009) “An investigation of quality in CO₂ laser cutting of aluminum”, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Rechnology*, 2, 61-69.

Tamura K, Ishigami R, Yamagishi R. Laser cutting of thick steel plates and simulated steel components using a 30 kW fiber laser. J Nucl Sci Technol 2016;53:916–20. <https://doi.org/10.1080/00223131.2015.1080633> .

Tarakçioğlu, N., Özcan, M., (2004) “Lazerler ve materyal işleme uygulamaları”, Atlas Yayın, İstanbul, 3-128.

Tutar M, Aydın H, Yuce C, Yavuz N, Bayram A. The optimisation of process parameters for friction stir spot-welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. Mater Des 2014;63:789–97. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.003> .

Ullah S, Li X, Guo G, Rodríguez AR, Li D, Du J, et al. Energy efficiency and cut-quality improvement during fiber laser cutting of aluminum alloy in the different hardened conditions. Mater Today Commun 2022;33:104236. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104236> .

Yılbaş B. S., (1998). “Study of parameters for CO₂ laser cutting process”, Materials and Manufacturing Processes, 13 (4): 517-536.

Yıldırım, S. (2011). Ürün tasarımı geliştirilmesi: Taguchi tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Yılmaz, E. ve Güngör, F. (2010). Gri ilişkisel analiz yöntemine göre farklı sertliklerde optimum takım tutucunun belirlenmesi. II. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.

Yuce C. Multi-objective optimisation for indentation rate, nugget diameter and tensile load in resistance spot welding using Taguchi-based grey relational analysis. Int J Mater Prod Technol 2021;63:321–38. <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2021.118352> .

Yuce C, Tutar M, Karpas F, Yavuz N. The optimization of process parameters and microstructural characterization of fiber laser welded dissimilar HSLA and MART steel joints. Metals (Basel) 2016;6. <https://doi.org/10.3390/met6100245> .

Wandera C, Kujanpää V. (2011, May). Optimization of parameters for fiber laser cutting of a 10 mm stainless steel plate. Proc Inst Mech Eng Part B Journal of Engineering Manufacture 2011;225:641–649. <https://doi.org/10.1177/2041297510394078> .

Wandera C, Kujanpää V, Salminen A. (2011, May) Laser power requirement for cutting thick-section steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf 2011;225:651–61. <https://doi.org/10.1177/09544054JEM1971> .

Wikipedia (2023) https://tr.wikipedia.org/wiki/Paslanmaz_Celik (Erişim tarihi: 09.01.2023)

Wikiwand, Ruby Laser. https://www.wikiwand.com/en/Ruby_laser. Accessed 07 Jan 2023

