



**AISI 304-310-316-430 PASLANMAZ SAÇLARIN  
LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME  
PARAMETRELERİNİN KERF GENİŞLİĞİ, ÇAPAK  
YÜKSEKLİĞİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE  
ETKİSİ**

**İbrahim CEBECİ**

**2021  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Halil DEMİR  
Dr. Öğr. Üyesi Barış ÖZLÜ**

**AISI 304-310-316-430 PASLANMAZ SAÇLARIN LAZERLE KESME  
İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KERF GENİŞLİĞİ, ÇAPAK  
YÜKSEKLİĞİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ**

**İbrahim CEBECİ**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı  
Prof. Dr. Halil DEMİR  
Dr. Öğr. Üyesi Barış ÖZLÜ**

**KARABÜK  
Ocak 2021**

İbrahim CEBECİ tarafından hazırlanan “AISI 304-310-316-430 PASLANMAZ SACLARIN LAZERLE KESME İŞLEMİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KERF GENİŞLİĞİ, ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Halil DEMİR .....  
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Dr. Öğr. Üyesi Barış ÖZLÜ .....  
Tez Danışmanı, Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 08/01/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)	.....
Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)	.....
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA (A.Ü)	.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ .....  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

İbrahim CEBECİ

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### LAZERLE KESME İŞLENMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN KERF GENİŞLİĞİ, ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İbrahim CEBECİ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Dr. Öğr. Üyesi Barış ÖZLÜ

Ocak 2021, 85 sayfa

Bu çalışmada, dört farklı paslanmaz sac malzemenin lazer yöntemi kullanılarak kesilmesinde kritik bir öneme sahip olan frekans, kesme hızı ve basınç gibi işleme parametrelerinin kerf genişliği, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde kullanım alanı oldukça fazla olan AISI 304–310–316–430 paslanmaz saclar malzeme olarak kullanılmıştır. Bu sac malzemelerin farklı işlemlere ihtiyaç duyulmaksızın lazer kesim yöntemi ile daha seri ve ekonomik bir biçimde kesilmesi planlanmıştır. Bu nedenle lazer tezgâhında dört farklı paslanmaz sac malzeme üzerinde toplam 128 adet kesik elde edilmiştir. İşleme parametreleri olarak; 4 mm malzeme kalınlığı; 20 mm/s, 24 mm/s, 28 mm/s, 32 mm/s kesme hızı; 0,8 bar, 0,9 bar basınç; 3500 Hz, 4000 Hz, 4500 Hz, 5000 Hz frekans seçilmiştir. 800 W lazer gücü, %100 güç yoğunluğu, 5" lens, 0,8 mm odak noktası

seçilmiştir. 800 W lazer gücü, %100 güç yoğunluğu, 5" lens, 0,8 mm odak noktası uzaklığı ve 2 mm nozul çapı kullanılmıştır. İşlemlerde oksijen yardımcı gaz olarak seçilmiştir. Kesme işleminden sonra numunelerin önce kerf genişliği, sonra çapak yüksekliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kesme parametrelerinin (kesme hızı, frekans, basınç) kerf genişliği ve çapak yüksekliğine olan etkileri araştırılmıştır. Ölçümler sonrasında malzemeler giyotin makinesi kullanılarak kesilmiş ve malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Sonuç olarak, kesme hızının artması yüzey pürüzlülüğünün, kerf genişliğinin ve çapak yüksekliğinin azalmasına neden olmuştur. Frekans değerinin artırılması yüzey pürüzlülük değerinin azalmasına ve kerf genişliğinin artmasına neden olmuştur.

**Anahtar Sözcükler :** Lazer kesim, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği, çapak genişliği.

**Bilim Kodu** : 91438

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE-EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON KERF WIDTH BURR HEIGHT AND SURFACE ROUGHNESS LASER CUTTING**

**İbrahim CEBECİ**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Manufacturing Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Halil DEMİR**

**Assist. Prof. Dr. Barış ÖZLÜ**

**January 2021, 85 pages**

In this study, the effects of processing parameters such as frequency, cutting speed and pressure, which are critical for cutting four different stainless steel materials using laser methods, on Notch width, Dross height and surface roughness values were examined. AISI 304-310-316-430 stainless sheets, which have a high range of uses in the experiments, were used as materials. These sheet materials are planned to be cut more rapidly and economically by laser cutting method” without the need for different operations. For this reason, a total of 128 cuts were obtained on four different stainless steel sheets in the laser machine. As processing parameters; 4 mm material thickness; 20 mm/s, 24 mm/s, 28 mm/s, 32 mm/s cutting speed; 0.8 bar, 0.9 bar pressure; 3500 Hz, 4000 Hz, 4500 Hz, 5000 Hz frequency was selected. 800 W Laser Power, 100% power density, 5" lens, 0.8 mm focal point distance and 2 mm nozzle diameter were

used. Oxygen was selected as the auxiliary gas in the processes. After cutting, first kerf width and then dross height measurements were performed. The effects of cutting parameters (cutting speed, frequency, pressure) on kerf width and dross height were investigated. After the measurements, the materials were cut using a guillotine machine and the surface roughness values of the materials were measured. The results have been interpreted. As a result, the increase in cutting speed caused a decrease in surface roughness, kerf width and the dross height. Increasing the frequency value caused the surface roughness value to decrease and kerf width to increase.

**Key Word** : Laser cutting, surface roughness, kerf width, dross height.

**Science Code** : 91438



## TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca, gösterdiği değerli desteği, sunduğu akademik gürüş ve önerileri, daima olumlu ve içten yaklaşımı ile bana yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Halil DEMİR'e saygılarımı sunar, en içten dileklerle teşekkür ederim.

Deney numunelerinin hazırlanması ve yazım aşamasında her zaman yanımda bulunup beni bilgilendiren ve yönlendiren, her daim ilgili ve destekleyici tavrıyla yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Dr. Barış ÖZLÜ 'ye teşekkür ederim. Numunelerin lazerle kesiminde desteğini esirgemeyen Tektem Makina San.ve Tic. A.Ő. fabrika müdürü Sayın Mustafa AKYURT'a ve çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmalarımda beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan, maddi ve manevi olarak destekleyen anneme, babama, ablama ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
BÖLÜM 3 .....	11
LAZER.....	11
3.1. LAZER IŞINI.....	11
3.1.1. Lazerin Tarihçesi ve Gelişimi.....	11
3.1.2. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensipleri .....	12
3.1.3. Dalga Boyu Diyagramında Lazerin Yeri.....	14
3.1.4. Lazer Işığının Özellikleri.....	14
3.1.4.1. Tek Renklilik (Monochromaticity).....	15
3.1.4.2. Koherent (Coherent) Özelliği (Uyumluluk Özelliği).....	16
3.1.4.3. Yoğunluk (İntensity).....	17
3.1.4.4. Yönlendirilebilirlik (Directivity) .....	18
3.2. LAZER ÇEŞİTLERİ .....	18

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.2.1. Optik Pompalı Lazerler .....	18
3.2.2. Sıvı Lazerler .....	18
3.2.3. Boyar Maddeli Lazerler .....	19
3.2.4. Kimyasal Lazerler .....	19
3.2.5. Dinamik Gaz Lazerleri .....	19
3.2.6. Yarı İletken Lazerler .....	19
3.2.7. Lazerlerin Yükselteç ve Titreşim Üretici Olarak Kullanılması .....	20
3.2.8. Kısa, Güçlü Darbeler Üreten Lazerler .....	20
3.2.9. Ayarlanabilir Lazerler .....	20
3.2.10. Katı Lazerler .....	21
3.2.11. Gaz Lazerleri .....	21
3.3. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	22
3.4. LAZERİN UYGULAMA ALANLARI .....	22
BÖLÜM 4 .....	24
LAZERLE KESME İŞLEMİ .....	24
4.1. LAZER İLE KESME .....	24
4.2. LAZER IŞINIMI İLE KESME METOTLARI .....	25
4.2.1. Lazer ile Eriterek Kesim .....	25
4.2.2. Lazer ile Yakarak (Alevli) Kesim .....	26
4.2.3. Lazer Işını ile Buharlaştırarak Kesme .....	27
4.3. LAZERDE KULLANILAN KESME GAZLARI .....	28
4.3.1. Oksijen .....	28
4.3.2. Azot ve Argon .....	29
4.4. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ .....	29
4.4.1. Endüstriyel Çelikler .....	29
4.4.2. Paslanmaz Çelik .....	30
4.4.3. Alüminyum .....	30
4.4.4. Titanyum .....	30
4.4.5. Bakır ve Pirinç .....	30
4.4.6. Sentetik Malzemeler .....	30
4.4.7. Organik Malzemeler .....	31

	<u>Sayfa</u>
4.5. LAZERLE KESME PARAMETRELERİ VE ÖZELLİKLERİ .....	31
4.5.1. Kerf Genişliği .....	31
4.5.2. Isı Tesiri Altında Kalan Bölge (ITAB).....	32
4.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü .....	33
4.5.4. Nozul Tipleri.....	33
4.5.5. Kesme Gazları .....	34
4.6. LAZER İLE KESME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI/ DEZAVANTAJLARI .....	35
4.6.1. Lazer ile Kesimin Avantajları.....	35
4.6.2. Lazerle Kesimin Dezavantajları .....	35
 BÖLÜM 5 .....	 36
PASLANMAZ ÇELİKLER .....	36
5.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	36
5.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	38
5.1.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	39
5.1.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	40
5.1.4. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	40
5.1.5. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler .....	41
 BÖLÜM 6 .....	 43
MATERYAL VE YÖNTEM .....	43
6.1. DENEY NUMUNESİ .....	43
6.2. LAZER TEZGÂHI.....	44
6.3. YÖNTEM.....	45
6.4. LAZER KESME PARAMETRELERİ .....	47
6.5. KERF GENİŞLİĞİ ÖLÇÜMÜ.....	48
6.6. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ ÖLÇÜMÜ .....	48
6.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ.....	49
 BÖLÜM 7 .....	 50
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR .....	50

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.1. KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	53
7.2. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
7.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	68
BÖLÜM 8 .....	75
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	75
8.1. SONUÇLAR .....	75
8.2. ÖNERİLER .....	78
KAYNAKLAR .....	79
ÖZGEÇMİŞ .....	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Kendiliğinden ışıma ve soğurma .....	13
Şekil 3.2. Uyarılmış ışıma.....	13
Şekil 3.3. Lazer tüpünün yapısı.....	13
Şekil 3.4. Dalga boyları ve lazerin yeri .....	14
Şekil 3.5. Prizmadan geçen beyaz ışığın renklere ayrılması .....	15
Şekil 3.6. Lazer, led ve güneş ışığı farkları.....	16
Şekil 3.7. Normal ışığın (1); Tek renkli ve Koherent lazer ışığın (2) yayılma şekli	17
Şekil 3.8. Lazer uygulama alanları .....	23
Şekil 4.1. Lazer kesim prensibi .....	24
Şekil 4.2. Azot gazı ile kesilmiş parça .....	26
Şekil 4.3. Lazer ışını ile alevli kesme .....	27
Şekil 4.4. Lazer ışını ile buharlaştırarak kesme .....	28
Şekil 4.5. Lazer kesme yüzey karakteristikleri .....	31
Şekil 4.6. Kerf genişliği .....	32
Şekil 4.7. Isı tesiri altında kalan bölge- ITAB .....	33
Şekil 4.8. Nozul tipleri .....	34
Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları. ....	37
Şekil 5.2. Bazı paslanmaz çeliklerin iç yapıları .....	38
Şekil 6.1. Lazer kesme cihazı ve kontrol paneli (SUNTOP ST-FC 3015). ....	45
Şekil 6.2. Sac lazer kesim ölçüleri a), numuneler üzerinden ölçüm yapılan konumlar b).....	46
Şekil 6.3. Kesme işleminden görünüm a) Ön yüz, b) Arka yüz. ....	47
Şekil 6.4. ISM-PM200SA dijital mikroskop. ....	49
Şekil 7.1. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	54
Şekil 7.2 AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	55
Şekil 7.3. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	55

Şekil 7.4.	AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	56
Şekil 7.5.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	57
Şekil 7.6.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	58
Şekil 7.7.	AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	59
Şekil 7.8.	AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri. ....	60
Şekil 7.9.	AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	62
Şekil 7.10.	AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	62
Şekil 7.11.	AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	63
Şekil 7.12.	AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	64
Şekil 7.13.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	65
Şekil 7.14.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	65
Şekil 7.15.	AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	66
Şekil 7.16.	AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.....	67
Şekil 7.17.	AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	69
Şekil 7.18.	AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	69
Şekil 7.19.	AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	70
Şekil 7.20.	AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	71
Şekil 7.21.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	71
Şekil 7.22.	AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.....	72

**Sayfa**

Şekil 7.23. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri..... 73

Şekil 7.24. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri..... 73



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 3.1. Yaygın olarak kullanılan lazerlerin uyumluluk mesafeleri.....	17
Çizelge 3.2. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması .....	22
Çizelge 6.1. Deneyleerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu. ....	43
Çizelge 6.2. Deneyleerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri. ....	43
Çizelge 6.3. SUNTOP ST-FC3015 Lazer tezgahının teknik parametreleri. ....	44
Çizelge 6.4. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler. ....	48
Çizelge 6.5. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellik.....	49
Çizelge 7.1. Deney sonuçları. ....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

mm/s	: kesme hızı
$\mu\text{m}$	: mikrometre
nm	: nanometre
W	: watt
kW	: kilowatt
MPa	: megapascal
mN	: milinewton
Hz	: hertz
$^{\circ}\text{C}$	: santigrat derece
N	: azot
C	: karbon
Mn	: mangan
Fe	: demir
P	: fosfor
S	: kükürt
Si	: silisyum
Cr	: krom
Ni	: nikel
Mo	: molibden
$\Lambda$	: dalga boyu

## **KISALTMALAR**

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

DIN : Deutsche Industrie Norm (Alman Standartları)

ISO : Uluslararası Standartlar Organizasyonu

CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alüminyum Oksit

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile taleplerde artış meydana gelmiş ve üretim işlemlerinin kaliteden ödün vermeden hızı arttırılarak yapılması bir zorunluluk haline gelmiştir. Sac metal endüstrisinde en önemli üretim yöntemlerinden biri olan kesme işleminin de hızlı ve kaliteli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Sac metaller giyotin makas, su jeti, plazma ve lazer gibi birçok yöntem ile kesilmesine rağmen lazerin sağladığı üstünlüklerinden dolayı lazer yaygın bir biçimde tercih edilmektedir. Uygun kesme parametreleri belirlenmesi durumunda çok hızlı ve kaliteli kesimler yapılabilmektedir [1].

Lazer teknolojisi elli yıldan fazla bir geçmişe sahip olup günümüze kadar birçok alanda geniş bir kullanım yelpazesine sahip olmuştur. Tıp, biyoloji, kimya elektronik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer teknolojiler ile yapılamayan işler bazen sadece lazer teknolojisi kullanılarak yapılabilir [2].

Lazer endüstri uygulamalarında kesme, delme, kaynak ve markalama gibi işlerde kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan lazer türleri CO<sub>2</sub> ve Nd:YAG lazerleridir. Çapaksız işleme yapmaları, malzeme ile parça arasında temas olmayışı gibi birçok avantajları bulunmaktadır. Dezavantajı ise yüksek kurulum ve bakım maliyetleridir [3].

Lazer ile kesme yöntemi kullanılarak metal ve metal dışı parçalar yüksek bir kesme kalitesi ve yüksek bir kesme hızı ile kesilebilmektedir. Lazer ile kesme yöntemi bilgisayar sistemi ile programlama yapılarak kullanılabilir. Bu sayede farklı biçimlerdeki birçok parçanın kısa işlem süreleri ile kesilmesi mümkün hale gelmektedir. Fakat bu yöntem ile yapılan kesimlerde kaliteli sonuçlar elde etmek

amacıyla uygun lazer kesim makinesinin seçilmesinin yanında uygun kesme parametrelerinin de tespit edilmesi gerekmektedir [4].

Bu çalışmada üretim sektöründe geniş bir kullanım alanı bulunan AISI 304-310-316-430 paslanmaz sac malzemelerin lazer yöntemi ile kesilmesi incelenmiştir. Kesme parametrelerinin kerf genişliği, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri araştırılmış ve malzemelerin lazer kesim tezgâhında daha seri ve ekonomik bir şekilde kesilmesi için uygun parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tunç ve arkadaşları yaptıkları çalışmada endüstride yaygın bir kullanım alanına sahip olan AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac malzemenin CO<sub>2</sub> lazer kesim tezgâhlarında kesilmesinde kullanılan işleme parametrelerinin kesme işlemine olan etkilerini incelemişlerdir. Deneyde güç, basınç, ilerleme hızı gibi parametreler değişken parametreler olarak belirlenmiş ve bu değerlerin kesme işlemi tamamlandıktan sonra yüzey kalitesine etkilerinin tespit edilmesi amacıyla kesme deneyleri yapılmıştır. Sonuçta AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin CO<sub>2</sub> lazer tezgâhında kesimi için ideal kesme parametreleri tespit edilmiştir. Bu parametreler 1700 W güç, 1600 mm/dak ilerleme hızı, yardımcı gaz azot ve 9 bar gaz basıncı olarak belirlenmiştir. Focus mesafesi 0 mm olarak seçilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün azot yardımcı gazı kullanımı, kesme gücü ve ilerleme miktarının azaltılması ve basıncın artırılmasıyla düşürüldüğü sonucuna varmışlardır [5].

Kurt, çalışmasında birçok sektörde etkin bir şekilde kullanılmakta olan plastiklerin lazer ile kesilmesi sırasında kullanılan kesme parametrelerini ve bu parametrelerin etkilerini inceleyerek ideal kesme parametrelerinin belirlenmesi üzerine deneyler yapmıştır. Deneylerde PTFE (teflon) ve POM (derlin) malzemeler kullanılmıştır. Güç, ilerleme hızı ve basınç değişken parametre olarak kabul edilmiştir. Malzemeler eşit çevre uzunluğuna sahip olmak üzere kare, üçgen ve daire kesitli olarak kesilmiş, kesilen parçaların boyutları ölçülmüştür. Değişkenli regresyon analizi ile boyut hesabı yapabilen denklemler oluşturulmuş ve varyans analizi ile değişken parametrelerin malzeme boyutu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney sonucunda PTFE ve POM malzemelerin lazer ile kesimi için en uygun değerler belirlenmiştir [6].

Ertem, çalışmasında otomotiv sanayisinde kullanılmakta olan 2,007 mm kalınlıklı 1.4301-X5CrNi18-8 ile 4,9 mm kalınlıklı 1.4418-X4CrNiMo16-5-1-ESU yüksek

alaşımli paslanmaz çelikleri malzeme olarak kullanmıştır. Bu malzemelerden hazırlanan numuneler Nd:YAG sürekli olarak enerjisini açığa çıkaran ışınlar kullanılarak kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler sonucunda numunelerin sertlik ölçümleri yapılmış ve dikiş geometrileri fotoğraflanarak incelenmiştir. Lazer punta süresi, gücü ve lazer kaynak gücü gibi kaynak parametrelerinin dikiş geometrisine olan etkileri incelenmiştir. İncelemeler sonucunda kaynak parametrelerinde yapılan değişiklikler yardımıyla kaynak dikiş bölgesinde meydana gelen boşlukların azaltılabileceği, yeterli nüfuziyetin sağlanabileceği, istenmeyen durumların ortadan kaldırılabilceği tespit edilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan yüksek alaşımli paslanmaz çeliklerin 1000W güce sahip Nd:YAG lazeri ile iyi bir biçimde birleştirileceği tespit edilmiştir [7].

Zaied ve arkadaşları düşük karbonlu çelik malzemeyi deney malzemesi olarak belirlemişlerdir. Karbondioksit lazer ile kesim kullanılarak numuneleri kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlemler sırasında kesme hızı ve gücü değiştirmiş ve bu değişikliklerin kesmeye olan etkisini incelemişlerdir. Deneyler tamamlandığında testler yapılmış ve kesme hızının yüzey kalitesine büyük bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [8].

Rajaram ve arkadaşları çalışmalarında 4130 çelik malzemeyi kullanmışlardır. Bu malzemedan elde edilen numuneler CO<sub>2</sub> lazer ile kesme işlemine tabi tutulmuştur. Parametre olarak lazer gücü ve kesme hızı belirlenmiştir. Daha sonra bu parametrelerin kesme işlemine olan etkilerini incelemek amacıyla birtakım testler yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda güç düzeyi düşürüldüğünde kesme hızının artması ile ITAB ve kesme aralığında küçülme olduğu, güç düzeyi arttırıldığında ise kesme aralığında yine küçülme olduğu ancak ısı tesiri altında kalan bölgede artma olduğu tespit edilmiştir [9].

Choudhury ve Shirley çalışmalarında polimetil metakrilat, polipropilin ve polikarbonat olmak üzere üç farklı malzeme kullanmışlardır. Bu malzemelerden elde edilen numuneler CO<sub>2</sub> lazer kullanılarak kesme işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler ile kesim kalitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde polimetil metakrilatta oluşan ısıdan etkilenen bölgenin diğer iki

malzemeye göre daha küçük olduğu gözlemlenmiş ve en iyi yüzey kalitesinin bu malzemede elde edildiği belirtilmiştir [10].

El-Taweel ve arkadaşları Kevlar-49 kompozitinden elde ettikleri numuneler ile deneylerini gerçekleştirmişlerdir. CO<sub>2</sub> lazer ile numuneler kesilmiş ve kesme hızı, yardımcı gazın basıncı, lazerin modu ve malzeme kalınlığı gibi kesme parametrelerinin kesme işlemine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler sonucunda kesme kalitesinde etkisi en fazla olan parametrenin lazer gücü olduğu belirlenmiştir [11].

Chen, deneylerinde 3 mm yumuşak çelik malzemedan elde ettiği numunelerin 10 bar yardımcı gaz basıncı kullanılarak kesilmesini incelemiştir. 2 kW'lık lazer tezgâhı kullanılmıştır. Yardımcı gaz olarak oksijen, azot, argon ve basıncı yüksek hava kullanılmıştır. Deneyler sonucunda oksijenin en iyi yardımcı gaz olduğu, argon ve azot gazlarının da iyi alternatifler olduğu tespit edilmiştir [12].

Golnabi ve arkadaşları çalışmalarında çelikleri ve yumuşak çelik malzemeleri kullanmışlardır. Çalışmalar tamamlandığında kesme genişliğini tespit etmeyi hedeflemişlerdir. Deneyler sırasında 1-6 bar arasında değişiklik gösteren gaz basıncı ile 50-170 W arası lazer gücü kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda malzemeler için ortalama işleme parametre değerleri belirlenmiştir. Bu değerler yumuşak çelikler için ortalama 0,3 mm kesme genişliği, 1 bar gaz basıncı, 9,5 mm/sn kesme hızı ve 67 w kesme gücü olarak, 1-2 mm çelik numuneler için ise ortalama 0,2 mm kesme hızı, 4 bar gaz basıncı, 7,1 mm/sn kesme hızı ve 67 w kesme gücü olarak belirlenmiştir [13].

Karol, çalışmasında magnezyum alaşımlarından AM60B malzemelerin lazer kaynağı ile birleştirilebilirliğini araştırmıştır. Deneylerde numuneler cihazın ışık şiddeti değerleri değiştirilerek 0.65, 0.80, 1.10 mm odak çapları ile CO<sub>2</sub> lazer kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirme sonrasında kaynak genişliği, nüfuziyet gibi mekanik ve metalürjik özellikler ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Uygulanan çekme ve sertlik deneylerinin sonucunda 0,65 mm odak çapında çekme dayanımı en yüksek değerlere ulaşmıştır. Bu numunelerde kopma kaynak bölgesi dışında olmuştur.



AM60B magnezyum alaşımlarının lazer kaynağı yöntemi kullanılarak başarı ile birleştirilebileceği tespit edilmiştir [14].

Kulenovic ve arkadaşları tungsten alaşımından elde edilen numunelerin karbondioksit lazer ile kesilmesini incelemişlerdir. Değişken parametreler lazer gücü, yardımcı gaz basıncı ve kesme hızı olarak tespit edilerek bu parametrelerin değiştirilmesi ile deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak malzeme için ideal işleme parametreleri kesme hızı 1000 mm/dak, lazer gücü 2000 W ve yardımcı gaz 15 bar basınçlı nitrojen olarak belirlenmiştir [15].

Önçağ, çalışmasında lazer ve lazer imalat yöntemiyle çelik jant üretiminden bahsetmektedir. Çelik jant üretiminde geleneksel üretim yöntemleri yerine lazer imalat yöntemlerinin kullanılması tartışılmaktadır. Lazer kaynağı ve basınç kaynağı kullanılarak hazırlanan numunelerin mekanik özellikleri incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Sonuçlar çeşitli diyagram ve şekiller ile ortaya koyulmuştur. Sonuçta lazer ile yapılan jant üretimiyle enerji tasarrufu sağlandığı, bakım ve işçilik maliyetlerinin azaldığı, daha az işlem ile üretimin yapılabildiği, kaynak hızının daha yüksek olduğu, uygulama açısından zenginlik sağladığı ve daha az tezgâh kullanımı gerektirdiği tespit edilmiştir. Tüm bu sebeplerden dolayı bu yöntemin ilerde geleneksel yöntemlere rakip olacağı ortaya koyulmuştur [16].

Çelen, deneylerinde ana malzeme olarak 304 paslanmaz çelik malzeme kullanmıştır. Paslanmaz çelik levhalar lazer kaynak makinası ile farklı parametreler kullanılarak alın birleştirilmesi biçiminde kaynaklanmıştır. Parametre olarak gerilim, darbe enerjisi ve süresi belirlenmiştir. Bu parametrelerde yapılan değişikliklerin kaynak kalitesi ve dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ana malzemenin mukavemetine sahip bir birleştirme elde etmek için ideal parametrelerin 8,5 ms darbe süresi, 12,2 joule darbe enerjisi ve 250 Volt gerilim olduğu belirlenmiştir. Uygun kaynak hızı, koruyucu gaz ve darbe süresinin seçilmesiyle iyi bir kaynak profili elde edilebileceği anlaşılmıştır [17].

Kökey ve arkadaşları sektörde çamaşır makinesi tamburu olarak kullanılmakta olan ferritik 430 kalite paslanmaz çelik kullanmışlardır. 0.6 mm kalınlığındaki paslanmaz

çelikten elde edilen numuneler saf argon gaz ortamı ile darbeli fiber lazer kaynak makinası kullanılarak alın altına birleştirilmiştir. Darbe enerjisi, süresi, frekansı ve ışın çapı gibi kaynak parametreleri değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Birleştirme işlemi tamamlandıktan sonra numunelere çekme ve korozyon testleri uygulanarak kullanılan parametrelerin dayanım, korozyon ve mikroyapı gibi özellikleri nasıl etkilendiği araştırılmıştır. Testler tamamlandığında kaynak gücünde meydana gelen artış sonucu dayanımda da artış olduğu tespit edilmiştir. Taneler arasında korozyon ve pitting oluşumu gözlenmiştir [18].

Tokdemir, çalışmasında toz metalurjisi yöntemi kullanılarak 1120°C sinterleme sıcaklığında presleme basıncı 600 MPa olacak şekilde üretimi yapılan demir esaslı toz metal Fe-Grafit kompozitleri ve SAE 1020 malzemelerini kullanmıştır. Fe-Grafit kompozitleri toz-toz şeklinde birbiriyle, SAE 1020 malzemesi demir-demir olacak şekilde birbiriyle ve Fe-C kompozitleri SAE 1020 malzemesi ile toz-demir olacak şekilde farklı kaynak hızları (0,5-0,6-0,7-0,8-0,9 m/dak) kullanılarak karbondioksit lazer kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme işlemleri için gücü 2500 W, odaklama değeri 175 mm ve nozul çapı 18 mm olan lazer kaynak cihazı kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak argon seçilmiştir. Birleştirilen numunelere deneyler uygulanmış, mekanik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. İncelemelerin sonucunda toz metal numunelerde gevrek, diğerlerinde sünek kırılma tespit edilmiştir. Numunelerin lazer kaynak hızında artma olması ile çentik darbe, çekme, eğme dayanımlarında azalma, sertlik değerinde artma meydana geldiği gözlenmiştir [19].

Gördebil, bu çalışmasında LPG tank üretiminde kullanılan P265 NB çeliklerinin, MAG ve lazer kaynakları kullanılarak birleştirilmesi sonucunda, lazer kaynak yönteminin sahip olduğu üstünlükleri ortaya koymayı amaçlamıştır. Numunelerin bir kısmı CO<sub>2</sub> lazer tezgâhı ile lazer kesme kafasında bazı değişiklikler yapılarak alın bölgelerinden birleştirilmiştir. Bir kısım numune de MAG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Her iki yöntem kullanılarak elde edilen malzemeler mekanik ve metalografik olarak incelenmiştir. Radyografik incelemelerde lazer kaynak numunelerinde herhangi bir kaynak kusuru tespit edilememişken MAG kaynaklılarda birçok kusura rastlanmıştır. Sertlik ölçümlerinde kaynak dikişi sertliği lazer kaynaklı numunelerde ana metalin sertliğinin %75 üzerinde tespit edilirken

MAG kaynaklılarda %96 bulunmuştur. Tüm bu deneyler ile kaynak bölgesindeki mekanik özellikler belirlenmiş ve lazer kaynağının üstün özelliklerinin malzemeye olan etkilerinin incelenmesi yapılmıştır [20].

Vatandaş, çalışmasında genel itibariyle lazerden, lazer ile kaynaktan, lazer güvenliğinden bahsetmiştir. Lazer kaynağının imalat sanayinde kullanılmasıyla üretilmesi mümkün hale gelen hibrid profillerin düz profiller ile kıyaslamasını yapmış ve hibrid profillerin üstünlüğünü değerlendirmiştir [21].

Durukan, çalışmasında AISI 304 paslanmaz çelik ve DIN EN 10025-94 (TS 2162 EN10 025-96) yapı çeliğini malzeme olarak kullanmıştır. Bu çalışmada parça parametresi olarak malzeme çeşidi ve kalınlık kullanılmıştır. Lazer parametresi olarak ise kesme hızı, gaz basıncı, lazer gücü ve odak noktası seçilmiştir. İşlem sırasında kesme parametrelerinin değerleri değiştirilerek farklı değerler ile kesme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin kesik yüzeyleri incelenerek kesme parametrelerinin değiştirilmesiyle geometri, kesme kalitesi ve boyut değişimlerinde meydana gelen değişiklikler irdelenmiştir. Boyut kontrolleri CMM üç boyutlu ölçüm cihazıyla yapılmıştır, ayrıca yüzey pürüzlülük ölçümleri de yapılmıştır. Sonuçlar Minitab programı vasıtası ile yorumlanmıştır. Sonuçta düşük boyut toleransına sahip malzemelerde, kesme parametrelerinin daha önemi olduğu belirlenmiştir [22].

Tanrıverdi, çalışmasında DIN EN 10 025-64 kalite sac malzeme kullanmıştır. Bu malzemeden hazırlanan numuneler lazer ışını kullanılarak kesme işlemine tabi tutulmuştur. Numuneler kesilirken kesme gazı ve hızı, güç seviyesi gibi parametreler sıra ile değiştirilerek bu parametrelerin kesim kalitesine olan etkileri incelenmiştir. Deneyler tamamlandığında ortaya çıkan sonuçlar belirtilmiş ve parametrelerin değiştirilmesinin yüzey kalitesinde büyük farklılıklara yol açarken iç yapıda önemli bir değişikliğe sebep olmadığı tespit edilmiştir. İşleme parametrelerinde farklılıklar yapılarak istenilen yüzey pürüzlülüğü ve kesim kalitesi sonuçları elde edilebildiği anlaşılmıştır [23].

Lamikiz ve arkadaşları mukavemeti yüksek olan çelik malzemelerin en uygun şartlarda lazer ile kesilebilmesi için otomotiv alanında geniş bir kullanım alanına sahip

ZstE260 malzeme ile bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda malzeme kalınlığının etkin bir parametre olduğunu ve kalınlıktaki en ufak değişimlerin bile parametreleri etkilediğini tespit etmişlerdir [24].

Kujanpää ve arkadaşları, çalışmalarında malzeme olarak paslanmaz çelik kullanmışlardır. Deneylerinin amacı kalınlıkları 2 mm'den daha fazla olan paslanmaz çelikleri fiber lazer ve karbondioksit lazer ile keserek bu iki kesimin karşılaştırmasını yapmaktır. Sonuçta 4 mm kalınlığa kadar CO<sub>2</sub> lazer kesimin, 4 mm üzerinde ise fiber lazerin ideal sonuçlar vereceği saptanmıştır [25].

Karabulut, çalışmasında AA5005 alüminyum alaşımı numuneleri malzeme olarak seçmiştir. Deneylerde bu numuneler lazer ve TIG kaynağı ile birleştirilmiştir. Malzemenin bu yöntemler kullanılarak birleştirilmesi sonucu elde edilen kaynak kaliteleri mukayese edilmiştir. Kaynak işleminin tamamlanması ile mekanik özelliklerin tespit edilmesi amacı ile çeşitli testler uygulanmıştır. Testlerin sonucunda TIG kaynağı kullanılarak elde edilen kaynak şekli yarım ay biçiminde lazer kaynağı ile yapılan birleştirme sonucu elde edilen kaynak şeklinin ise anahtar deliği biçiminde olduğu tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımını TIG kaynağı ile birleştirilen T1 numunesinde görülmüştür. AA5005 alaşımlarının birleştirilmesinde TIG kaynağının lazer kaynağından daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir [26].

Topal, çalışmalarını AISI 410S ferritik paslanmaz çelik kullanarak gerçekleştirmiştir. Paslanmaz çelik levhalar plazma ark kaynağı ve robotik lazer kaynağı kullanarak argon koruyucu gazı ile, yatay pozisyonda alın altına birleştirilmiştir. Robotik lazer kaynağı ile dört farklı hız ve iki farklı güç kullanılarak, plazma ark kaynağı ile iki farklı hız, üç farklı plazma ark akımı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Birleştirme sonucunda lazer ve plazma ark kaynaklı birleştirmeler mekanik ve mikro yapısal olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda her iki birleştirme türünden sonra da mikro yapıda herhangi bir gözenek, krom karbür oluşumu, gevrek çatlama tespit edilmemiştir. Kaynaklı birleştirmelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde herhangi bir inklüzyon ile karşılaşmadığı gözlemlenmiştir. Birleştirmeler sonrasında ortaya çıkan sünekliğin ana malzeme sünekliğinden daha düşük olduğu bulunmuştur [27].

Uzun, çalışmasında AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanmıştır. Bu malzemeden elde edilen numuneler lazer gücü, koruyucu gaz debisi ve kaynak hızı gibi parametreler değiştirilerek lazer kaynağı ile alın alına birleştirilmiştir. Çalışmalarda parametreler koruyucu gaz debisi 10, 12, 14, 16 l/dk, kaynak hızı 100, 200, 300, 400 mm/dk ve lazer gücü 1000, 2000, 3000 ve 4000 W olacak şekilde belirlenmiş ve her işlem için bir parametre değiştirilerek kullanılmıştır. %50 Ar ve %50 He karışımı ile elde edilen koruyucu gaz kullanılmıştır. Birleştirmeler sonucu metalografik incelemeler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde kaynak bölgelerinde malzeme kalınlığı boyunca nüfuziyetin tam olduğu tespit edilmiştir. Katılaştıran kaynak metalinin formunun anahtar deliği şeklinde olduğu belirlenmiştir. Kaynak hızında meydana gelen artış ile kaynak metalinin genişliğinde azalma olduğu görülmüştür. Isının artmasıyla eğme dayanımının ve kaynak metalinin sertliğinin arttığı anlaşılmıştır [28].

Odabaşı, deneylerinde Inconel 718 ve Haynes 188 süper alaşımlarının karbondioksit lazer tezgahlarında kaynak edilebilirliklerini incelemiştir. Lazer ışını kullanılarak numuneler alın kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleşme esnasında lazer gücü ve kaynak işlem hızı parametreleri değiştirilerek bu parametrelerin kaynak kalitesi ve mikroyapı özelliklerine olan etkileri incelenmiş ve tespit edilmiştir. Bu malzemelerin işlenmesi için en uygun parametreler belirlenmiştir [29].

## BÖLÜM 3

### LAZER

#### 3.1. LAZER IŞINI

##### 3.1.1. Lazerin Tarihçesi ve Gelişimi

Lazerin tarihi 1917 yılına dayanmaktadır. Temelleri Albert Einstein tarafından atılmıştır. Albert Einstein ışığın yükseltilmesi ile yüksek yoğunlukta lazer ışığının elde edilmesini sağlayan uyarılmış ışınım teriminin esaslarını açıklamıştır [30]. Teorisine göre enerji seviyesi uyarılmış ışınım düzeyinde olan bir atom daha alt bir seviyeye indiğinde foton yayarak enerji oluşturur [31].

Albert Einstein tarafından ortaya koyulan uyarılmış ışınım teorisi baz alınarak ikinci dünya savaşı sırasında Columbia Üniversitesinde Charles Townes ve arkadaşları tarafından ilk mikro dalga lazeri MASER (Microwave Amplification by Stimulation Emission of Radiation) bulunmuştur [32]. 1954 yılında geliştirilen MASER mikrodalgaların amonyak kullanımı ile yükseltilmesi temeline dayanmaktadır. O dönemde MASER'e olan ilgi oldukça artsa da günümüzde yalnızca radyo astronomi alanında karşımıza çıkmaktadır. MASER'in bulunmasının ardından optik bölgelerde kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak lazer ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır.

Başlangıçta C.Townes ve A.L. Schowlow lazerin üretilmesi için gerekli işlemleri ve şartları belirlemiştir. 1960 yılında Theodore H.Maiman yakutla çalışan ilk lazeri bulmuş ve sonrasında P.P.Sorokin ve M.J. Stevenson uranyum lazerini bulmuştur. Yine aynı yıl içerisinde Ali Javan ve arkadaşları helyum-neon lazerini bulmuşlardır. 1963 yılında karbondioksit lazerini C.Kumar ve N.patel bulmuş, 1964 yılında Joseph

Geusic ve arkadaşları Nd:YAG lazeri bulmuştur.1970li yıllara gelindiğinde argon lazeri üretilmiştir [33].

Lazer teknolojileri günümüze kadar sürekli gelişme göstermiş ve farklı özelliklere sahip birçok lazer çeşidi üretilmiştir.

### 3.1.2. Lazerin Tanımı ve Çalışma Prensibi

Lazer, birçok kullanım alanına sahip olan ışığın çok özel bir çeşididir. Light amplification by stimulated emission of radiation sözcüklerinin baş harfleri ile oluşturulan lazer kelimesi uyarılmış ışınım yayınıyla ışığın kuvvetlendirilmesi manasına gelmektedir ve atomik bir enerjiyi elektromanyetik bir enerjiye çevirmektedir. Lazer yüksek bir ışıktır ve tek bir dalga boyuna sahiptir.

Lazerler uyarılmış ışımaya ilkesi ile çalışmaktadırlar. Bu ilke üç esasa dayanmaktadır. Bu esaslar soğurma, uyarılmış ışımaya, kendiliğinden ışımadır.

$E_1$  = Düşük seviyeli atomun enerjisi

$E_2$  = Yüksek seviyeli atomun enerjisi

$E = E_2 - E_1$

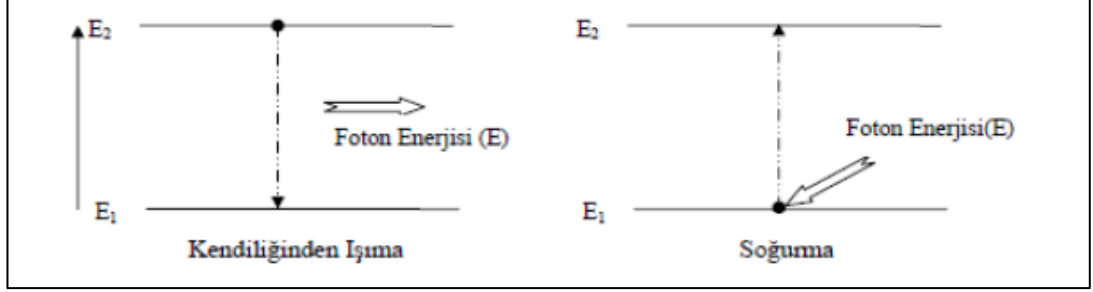
$E$  = Foton enerjisi

Yüksek seviyede yer alan bir atomun seviyesi daha düşük bir atom haline foton yayarak ve kendiliğinden geçmesi olayına kendiliğinden ışımaya denir.

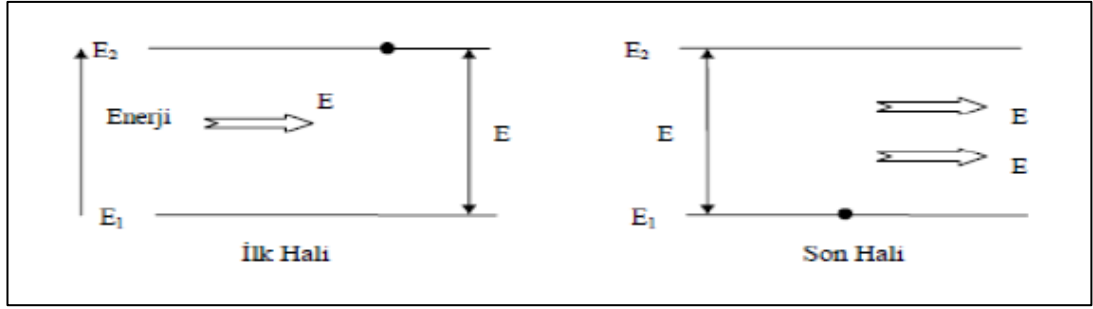
Düşük seviyeli bir atomun yüksek seviyedeki bir atomun enerji seviyesine foton soğurmak sureti ile geçmesi olayına soğurma denir.

Yüksek enerji seviyesine sahip bir atomun foton etkisi ile uyarılarak daha düşük seviyeye geçmesi olayına uyarılmış ışımaya denir. Geçiş esnasında yüksek enerji seviyesi ile düşük enerji seviyesi arasında bulunan fark kadar enerji foton olarak dışarıya salınır. Salınan foton başka bir atomun elektronunu uyararak kendine özdeş

yeni bir foton oluşmasını sağlar. Bu özdeşlik doğrultusunda iki fotonun hareketleri eşzamanlı olduğundan ışık güçlenir [34].

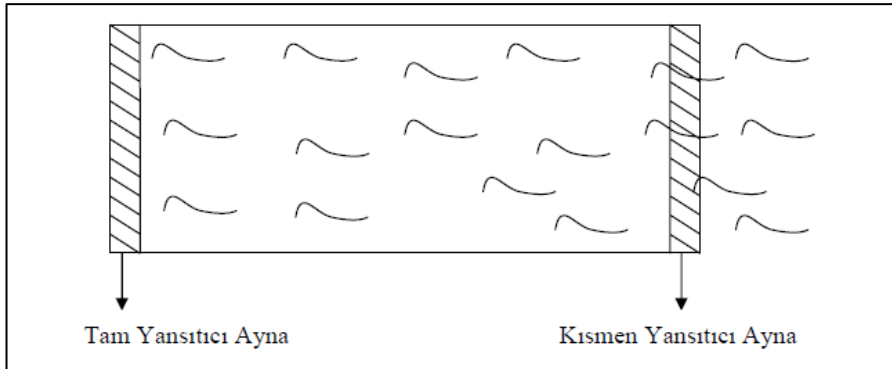


Şekil 3.1. Kendiliğinden ışıma ve soğurma [34].



Şekil 3.2. Uyarılmış ışıma [34].

Bu prensibe dayanarak lazerin üretilmesi optik bakımdan saydam, bir ucunda tam sırlı ve yansıtıcı, diğer ucunda yarı sırlı ve kısmen yansıtıcı ayna bulunan bir lazer tüpü içerisinde gerçekleşir.

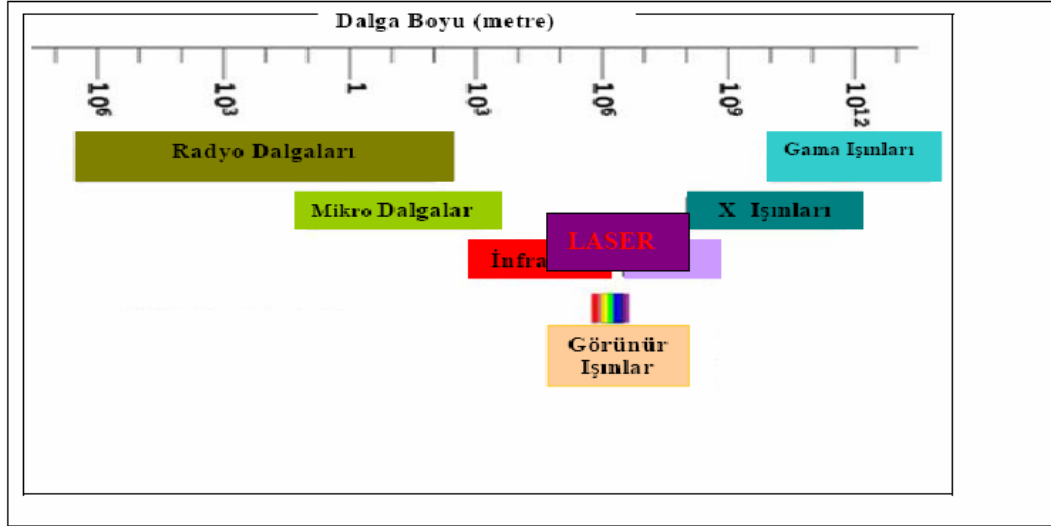


Şekil 3.3. Lazer tüpünün yapısı [34].



Lazer tüpü katı, sıvı ya da gaz bir madde ile doldurulur. Dışarıdan ışık ya da ortamdan elektrik akımı geçirmek suretiyle lazer tüpüne dışarıdan enerji verilir ve ortamdaki atomlar uzaklaştırılır. Atomların bazıları enerjiyi emer ve fazla enerji bu atomları kararsız bir hale getirir. Kendilerine foton çarpan, kararsız halde ve uyarılmış vaziyetteki atomlar foton yayarlar ve kararsız halden kararlı hale geçmeye çalışırlar. Yayılan fotonlar aynalardan yansiyarak geri dönerler ve tepkimeyi hızlandırır. Uyarı ile ortamda bulunan fotonlarda artış meydana gelir. Atomların neredeyse tamamının foton yayması ile kuvvetlenen ışık kısmen yansıtıcı ayna bulunan uçtan dışarı çıkar. Kuvvetlenerek dışarı çıkan bu ışın lazer ışınıdır [35].

### 3.1.3. Dalga Boyu Diyagramında Lazerin Yeri



şekil 3.4. Dalga boyları ve lazerin yeri [36].

### 3.1.4. Lazer Işığının zellikleri

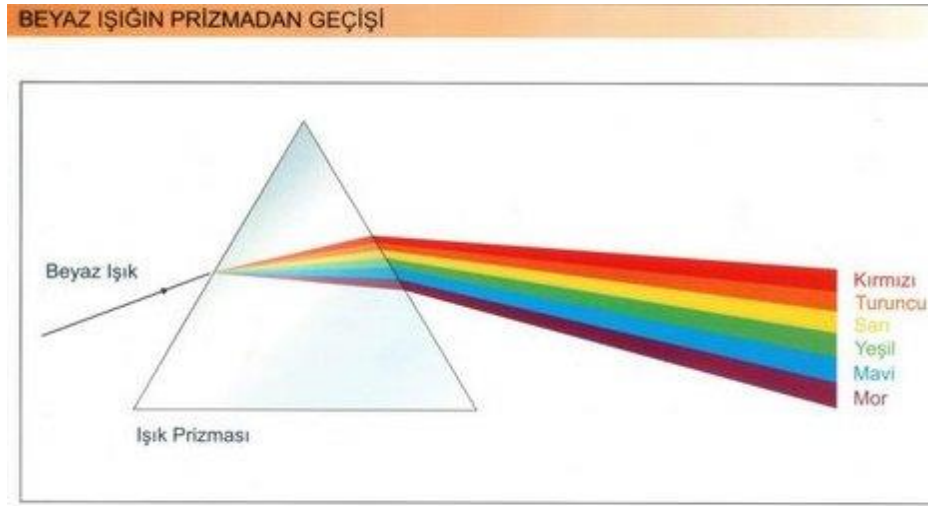
Lazer ışığını, normal bir ışıktan ayıran farklı özellikler mevcuttur. Bu zellikler;

1. Tek renklilik (Monochromaticity),
2. Uyumluluk (Coherence),
3. Yoğunluk (Intensity),
4. Yönlendirilebilirlik (Directivity)

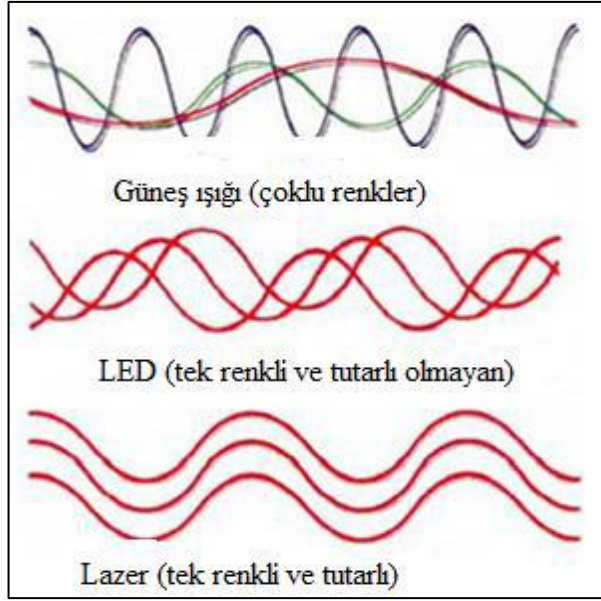
### 3.1.4.1. Tek Renklilik (Monochromaticity)

Tek renklilik bir grup fotonun tek bir frekansa sahip olması özelliğidir. Lazer ışığında bulunan fotonların tamamının dalga boyları aynı olmasından dolayı lazer ışığı tek renklidir [37].

Tek renklilik lazer ışığının en önemli özelliklerinden bir tanesidir. Bu, ışığın yalnızca tek bir dalga boyuna sahip olduğu anlamına gelir. Diğer kaynakların örneğin bir ampulün yaydığı ışık tek renkli değildir ve bu ışıklar prizmadan geçirilmesi durumunda birçok renge ayrılır [38].



Şekil 3.5. Prizmadan geçen beyaz ışığın renklere ayrılması [38].

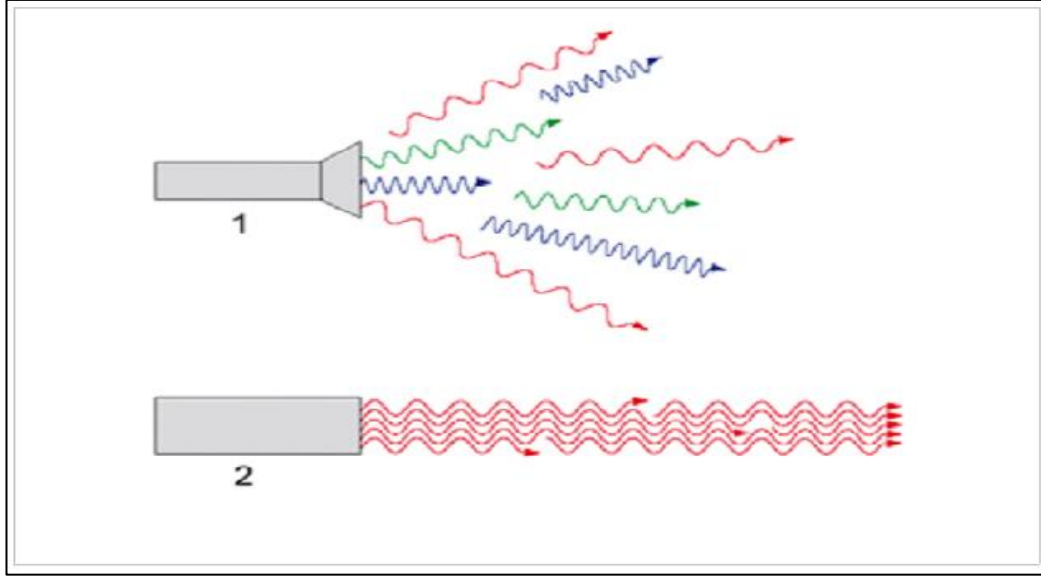


Şekil 3.6. Lazer, led ve güneş ışığı farkları [39].

Dalganın kendisini tekrarladığı mesafeye dalga boyu “ $\lambda$ ” denir. Görülebilir her ışığın kendine has bir dalga boyu vardır [38].

#### 3.1.4.2. Koherent (Coherent) Özelliği (Uyumluluk Özelliği)

Lazer dışındaki diğer ışık kaynaklarının tümünde elde edilen ışık aynı fazda (bağdaşık) değildir. Yani demet içinde bulunan tüm ışınlar aynı fazda değildir. Tabiatında lazer ışınları birbirleriyle uyumludur. Frekansı, doğrultusu ve fazı aynı olan iki dalga birbiriyle uyumlu dalgalar olarak tanımlanır. Uyumlu olan bütün dalgalar sinüzoidal olup belirli bir dalga boyu ve genliğe sahiptir [38].



Şekil 3.7. Normal ışığın (1); Tek renkli ve Koherent lazer ışığın (2) yayılma şekli [38].

Çeşitli lazerlerin uyumluluk mesafeleri çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yaygın olarak kullanılan lazerlerin uyumluluk mesafeleri [40].

Lazer Tipi	Tipik Uyumluluk Uzunluğu (m)
He-Ne Tek modlu	<1000
He-Ne Çok modlu	0.1-0.2
Nd:YAG	$1 \times 10^{-2}$
Nd: Cam	$2 \times 10^{-4}$
GaAs	$1 \times 10^{-3}$
Yakut	$1 \times 10^{-2}$

### 3.1.4.3. Yoğunluk (İntensity)

Lazer demetinin ürettiği ışık çok yoğun bir ışıktır. Lazerlerin pompalanma esnasında aldıkları ışınlar küçük değerlerdeki yoğunluklara sahip olsa da optik boşluk sayesinde bu lazerden alınan ışığın yoğunluk değeri yüksektir. Bunun sebebi uyarılmış ışınım ile foton yayan atomların bütün fotonlarını paralel bir biçimde eş fazlı olarak yaymalarındır [37].

Bir yüzeye birim zamanda ulaştırılan enerji ile bir ışık kaynağının şiddeti ölçülür. Bir noktaya gelen dalgalar aynı fazda ise birbirlerini güçlendirir, farklı fazda ise

zayıflatırlar. Lazerler çok dar bir demette ışıklarını topladıklarından dolayı görünümleri parlaktır [40].

#### **3.1.4.4. Yönlendirilebilirlik (Directivity)**

Işık kaynaklarının günlük hayatta kullandıklarımızın tümünden her yöne ışık yayılmasına rağmen lazer ışıkları tek renkli olmalarından dolayı epey dar bir bantta ışık yaymaktadırlar. Belli bir mesafe aşıldıktan sonra genişleme başlar. Optik sistemler yardımı ile lazer ışın demetinin kolayca yönlendirilebildiği gözlemlenmiştir. Lazerlerin en belirgin ve önemli özelliklerinden biri de ışığının yönlendirilebilir olması ve doğrultusunun değiştirilebilmesidir. Sigara dumanının bile lazer ışığını saçtığı ve yönlendirdiği görülebilmektedir [37].

### **3.2. LAZER ÇEŞİTLERİ**

#### **3.2.1. Optik Pompalı Lazerler**

Lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek bir frekansa sahip ışık düşürülerek lazer etkisinin oluşması için atomların yüksek enerji seviyelerine çıkmaları sağlanabilir. Bu işleme optik pompalama ismi verilir ve verimi düşük olduğundan yüksek bir pompalama gerektirmektedir. İşlemde uçları düz ve paralel olacak şekilde parlatılan ve ışığın yansımaları amacıyla ayna ile kaplanmış, yan çeperi saydam bir çubuk bulunur. Saydam yan çeper vasıtasıyla pompalayıcı lambadan gelen ışık çubuğun içerisine girer. Pompalayıcı lamba çubuğun yanına yerleştirilmiş veya çevresine sarılmış olabilir. Başlarda pembe yakut sonraları birçok toprak elementleri kullanılmıştır. En yaygın kullanılan ise neodimdir. Bu tür lazer ile binlerce watt'lık güce ulaşılabilir [41].

#### **3.2.2. Sıvı Lazerler**

Sıvı lazerler solventler içinde organik boyaların seyreltilmesi ile yapılan solüsyonlardan oluşmuştur. Herhangi bir lazer kaynağı yardımı ile enerjilendirilerek

oluşturulabilir. Tek bir dalga boyu yoktur, kullanılan maddeye göre belli bir spektrumda istenilen dalga boyuna ayarlanabilir [42].

Katı lazerlerde yüksek güçte çalışma esnasında oluşan ya da pompalama lambasından oluşan ısının etkisiyle hasarlar meydana gelebilir ancak sıvı lazerde camsı çubuk vb. bulunmadığından bu gibi sıkıntılar yaşanmaz [41].

### **3.2.3. Boyar Maddeli Lazerler**

Bazı organik boyar maddeler üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlama özelliğine sahiptirler. Boyarmaddelerin atomlarının uyarılmış halde bulunma süreleri çok kısadır ve yayımlanan ışığın dar bir bantta toplanması mümkün değildir. Buna rağmen lazerde kullanılmaları geniş bir frekans bölgesinde ayarlanabilme özelliğine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır [41].

### **3.2.4. Kimyasal Lazerler**

Bazı kimyasal reaksiyonlarda lazer etkisini oluşturmaya yetecek kadar yüksek enerjili atomlar oluşur. Az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek mümkündür [36].

### **3.2.5. Dinamik Gaz Lazerleri**

Hızla soğutulan sıcak bir gazda, düşük enerji seviyelerinin birindeki moleküllerin sayısı yüksek bir seviyedeki moleküllerin sayısının altına düşebilecek şekilde daha hızlı azalabilir. Bu lazerden 30.000 W'ın üstünde yüksek güçler oluşturulabilmiştir [36].

### **3.2.6. Yarı İletken Lazerler**

Bu tür lazerlerde iki farklı türden oluşturulmuş iki yarı iletken malzeme düzgün bir birleşim oluşturacak şekilde yan yana getirilir. Daha sonra yüksek şiddetli elektrik

akımı bu aygıttan geçirilir ve birleştirme bölgesinde lazer ışığı meydana gelir. Bu lazerlerin maliyetleri uygundur, boyutları küçüktür ve verimlilikleri yüksektir [36].

### **3.2.7. Lazerlerin Yükselteç ve Titreşim Üretici Olarak Kullanılması**

Lazerlerde genellikle uzun ve dar bir sütun biçiminde iki ucunda birbirine bakan aynalar bulunan etkin malzeme bulunmaktadır. Aynaların kaldırılması suretiyle bu aygıt lazer demetinin gücünü yükselterek daha güçlü bir lazer demeti oluşturabilir. Aynaların olması aygıtın bir titreşim üretici olarak kullanılmasına neden olur [36].

### **3.2.8. Kısa, Güçlü Darbeler Üreten Lazerler**

İki uca yerleştirilen aynalar ile yükselteç görevi gören sütun arasına yerleştirilen engelleyici kapalıyken lazer etkisi oluşmaz. Ancak lazer oluşumu için gerekli şartların sağlanması ile engelleyicinin aniden açılması durumunda sütun içerisine depolanan enerji çok kısa süren ve çok güçlü bir ışık darbesi şeklinde ortaya çıkar. Bu olaya Q anahtarlama adı verilir.

Bir lazer çoğunlukla değişik kipte yani frekanslarda titreşim yapar ve kip kilitlemesi denen bir yöntem ile bu değişik frekanslar eş zamanlanabilir. Bu yöntem daha güçlü ve daha kısa süreli darbeler oluşturmayı sağladığından hızlı delik açma işlemlerinde kullanılır. [36].

### **3.2.9. Ayarlanabilir Lazerler**

Lazerin frekansının ayarlanabilmesi önemli bir özelliktir ve boyar maddeli lazerler bu özelliği sağlayan lazerlerin başında gelmektedir. Aynalardan birinin belirli bir frekansta bulunan ışığı yansıtan bir ayna ile değiştirilmesi ile istenilen dalga boyu seçilir [41].

### 3.2.10. Katı Lazerler

Katı lazerler yarı iletken olmayan kristal ve camlardan yapılan lazerlerdir. Katı lazerlere örnek olarak verilen içerisinde  $CR^{+3}$  ilave edilen yakut kristallerinden oluşturulan yakut lazeridir. Yakut lazeri çubuk biçiminde  $AL_2O_3$  içinde çözünmüş %0.005  $CR^{+3}$  iyonları ile elektrik lambasından oluşur. Lambadan yayılan fotonlar  $CR^{+3}$  iyonlarını uyarır ve enerji seviyelerini yükseltir. Foton yayan elektronları enerji seviyelerinde düşüş meydana gelir ve uyarılan Cr elektronunun sayısında artış oldukça daha fazla elektron dalgaları yayılır.

Yakut lazerin rengi kırmızıdır ve dalga boyu 0.6927 mikrondur. Yakut lazerinin bir ucunda tamamı gümüş kaplı yansıtıcı ayna bulunurken bir diğer uca gümüşle az kaplanan geçirgen ayna bulunmaktadır.

Endüstriyel alanda kullanılan en yaygın katı cisim lazeri Neodim YAG lazeridir. Bu türde Neodim, lazer yayan eleman görevini üstlenir. Katı cisim atomları gazlara göre daha yoğun biçimde dizildiğinden birim hacme düşen atom sayısı daha fazladır. Bu nedenle katı lazerlerin çıkış yoğunluğu daha yüksektir.

Yeni geliştirilen iyot lazer tekniğinde ise aktif madde görevini atomik haldeki iyot üstlenir. Bu teknik ile çok güçlü lazer üretilir [42].

### 3.2.11. Gaz Lazerleri

Gaz lazerler verimlerinin yüksek olması, çevre koşullarından etkilenmeyişleri, çıkışta ideal ışık kaynağı durumuna yaklaşımları, geniş dalga boyu seçim imkânı ile en kullanışlı lazer tipidir. Atomik, iyonize ve moleküler gaz lazerleri olmak üzere üçe ayrılırlar.

Atomik gaz lazerlerinde dalga boyu 1.15  $\mu m$  ve 3.39  $\mu m$  arasında değişmektedir. Genellikle kırmızı veya kırmızıya yakın ya da başka renklerde lazer ışığı verirler. Helyum-Neon gazı aktif madde olarak kullanılırsa mavimsi-yeşil renge sahip lazer ışığı üretilir. İyonize gaz lazerine ise Argon lazeri örnek verilebilir. Bu gaz lazerleri



mavi veya yeşil renge sahip lazer ışığı verirler ve bu ışığın dalga boyu 0.488  $\mu\text{m}$  ve 0.514  $\mu\text{m}$  arasında değişir. Lazer cihazına verilen elektrik enerjisi ile argon atomları elektronlar ile çarpışarak iyonlaşır ve güç yayılır. Yayılan bu güç çok yüksek olmaktadır.

Moleküler gaz lazerlerinde ise lazer aktif maddesi görevini  $\text{CO}_2$ , He veya  $\text{N}_2$  üstlenir.  $\text{CO}_2$  lazerinde  $\text{CO}_2$  molekülleri  $\text{N}_2$  molekülleri ile çarpıştığı esnada lazer ışığı oluşmaktadır.  $\text{CO}_2$  lazeri sürekli ve güçlü ışık vermesi ve veriminin yüksek olması nedeniyle endüstride yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Elde edilen ışığın dalga boyu 1.15 mikrondur [42].

### 3.3. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

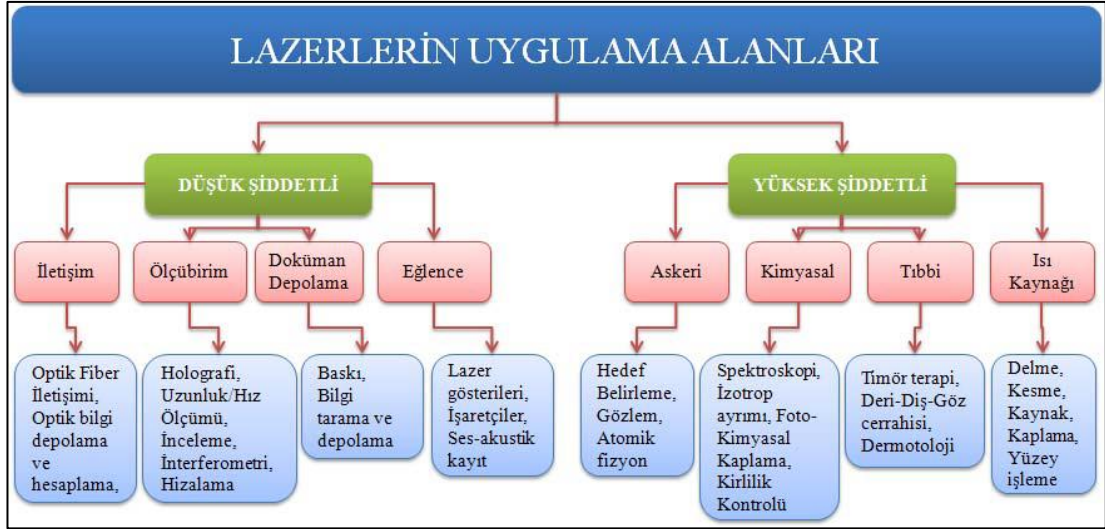
Yaygın kullanım alanı bulunan bazı lazerlerin karşılaştırılması Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması [43].

	<b>Fiber Lazer</b>	<b><math>\text{CO}_2</math> Lazer</b>	<b>Nd:YAG Lazer</b>
Maksimum Lazer Gücü (W)	100	60	10
Lazer Dalga Boyu (mm)	1.07	10.6	1.06
Verim Oranı (%)	20-30	5 (eski)-15 (yeni)	2 (eski)-10 (yeni)
Odaksal Uzunluk (mm)	200	150	300
Spot Çapı(mm)	420	430	512
Işın Çarpımı (mm*mrad)	11.7	23.9	15.3
Işın Demeti İletimi	Fiber kablo	Ayna-mercek	Fiber kablo
Taşınabilirlik	Yüksek	Düşük	Düşük
Ömür (saat)	100000	Belirsiz	10000
Soğutma	Hava, su	Dionized, gaz, su	Su
Enerji Besleme	Priz	Trafo	Trafo

### 3.4. LAZERİN UYGULAMA ALANLARI

İlerleyen teknoloji ile her geçen gün daha fazla gelişen lazer teknolojisi savunma sanayi, sağlık sektörü, uzay ve havacılık gibi birçok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir.



Şekil 3.8. Lazer uygulama alanları [44].

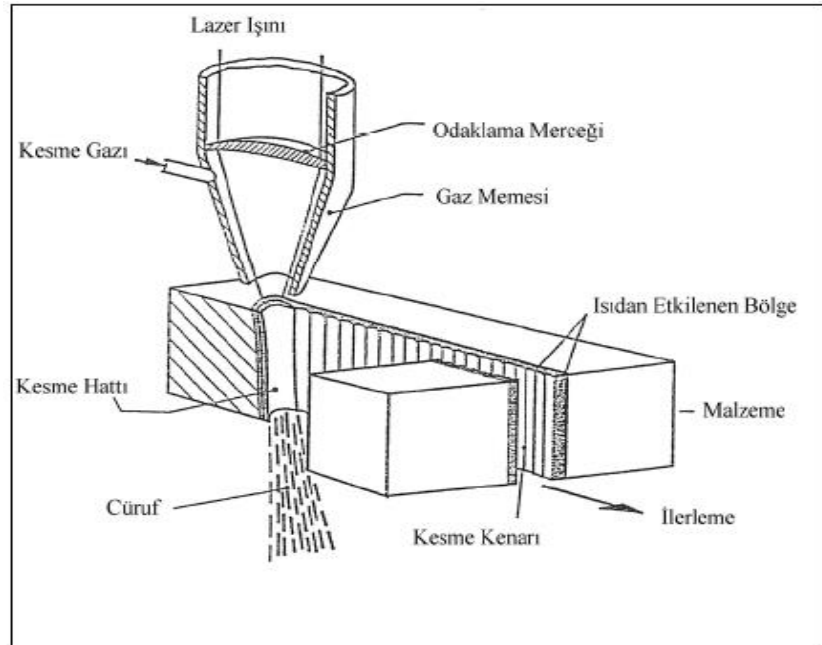
## BÖLÜM 4

### LAZERLE KESME İŞLEMİ

#### 4.1. LAZER İLE KESME

Lazerle kesme işlemi birçok alanda yaygın olarak kullanılan ve önemli üstünlüklere sahip olan bir kesme yöntemidir. Bu kesme yöntemi bir ısı işlemidir ve bu işlem esnasında lazer ışını bir ısı kaynağı, kesici görevini üstlenmektedir. Kesimin iyi olması ve erimiş malzemenin dışarı atılıp malzemeye yapışmasının önlenmesi için lazer ışınının malzemeye tam bir biçimde nüfuz etmesi gerekmektedir [34].

Erimiş malzemeyi malzemedan ayırıp gidermek amacıyla basınçlı bir gaz jeti de uygulanabilir [45].



Şekil 4.1. Lazer kesim prensibi [34].

Yöntemde lazer ışını iş parçası üzerine odaklanır, odaklanan lazer ışınının parçaya çarptığı bölge yüksek yoğunluktaki enerji ile ergime sıcaklığına kadar ısıtılır ve malzemenin erimesi veya buharlaşmasına neden olur. Lazer ışınının parçayı delmesinin ardından kesme işlemi başlar. Kesme bölgesinde meydana gelen eriyen malzemeyi ortamdan uzaklaştırmak için yardımcı bir gaz kullanılabilir [46].

## **4.2. LAZER IŞINIMI İLE KESME METOTLARI**

Lazer kesmenin üç farklı metodu bulunmaktadır. Bunlar;

1. Lazer ile Füzyon (Eriterek) Kesim
2. Lazer ile Yakarak (Alevli) Kesim
3. Lazer Işını ile Buharlaştırarak Kesme

### **4.2.1. Lazer ile Eriterek Kesim**

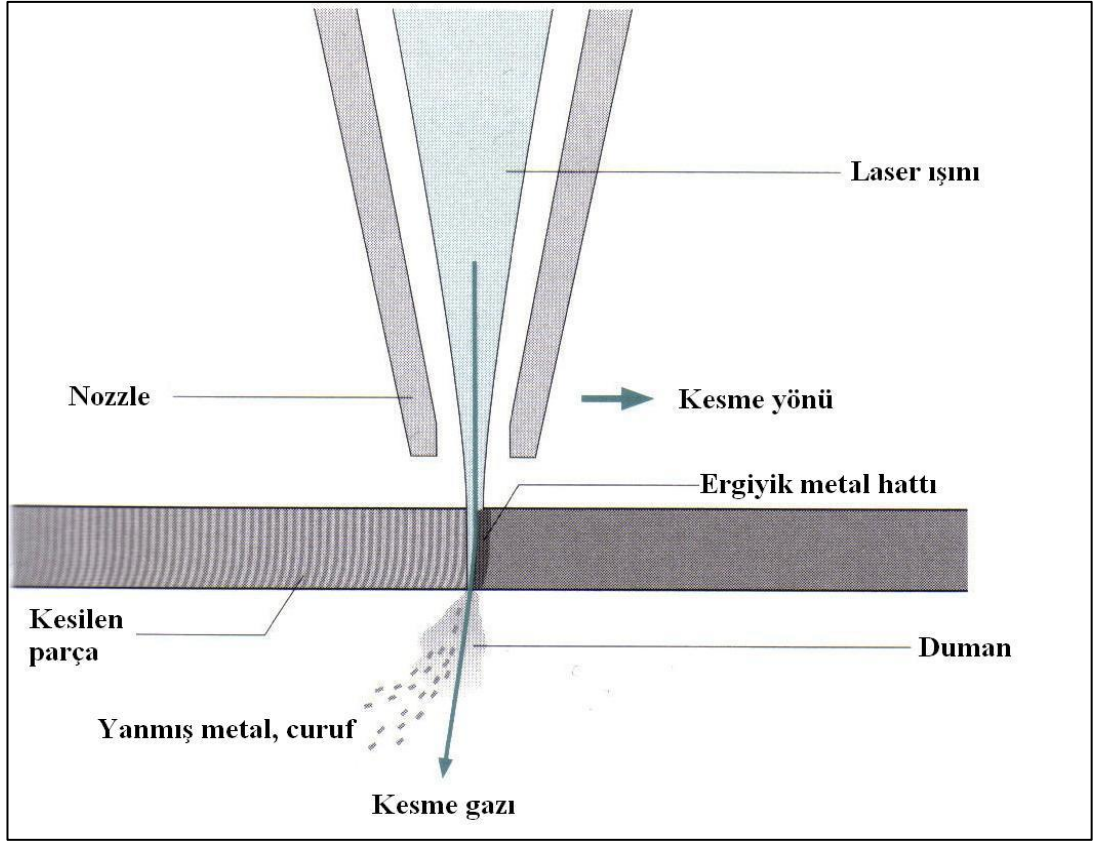
Bu yöntemde kesme gazı azot ya da argondur. Bu gaz 2–20 bar arasındaki basınç değerlerinde, odaklanan ışın ile malzeme yüzeyine gönderilir. Malzeme ilk olarak kesme bölgesinde ergitilir. Ergitiminin ardından ergiyen malzeme kesme gazı ile kesme yarığında uzaklaştırılır. Yöntemde kullanılan gazların inert olmasından dolayı ergiyen metalde herhangi bir reaksiyon oluşmaz ve yalnızca ergiyen malzeme ortamdan uzaklaştırılır. Azot gazı titanyum haricindeki tüm metallerin kesme işlemi için kullanılırken titanyumun oksijen ve azot ile tepkimeye girme eğilimi sebebiyle bu malzemenin kesiminde argon kullanılır. Yöntemde kesme yüzeyleri oksit tabakası ile kaplanmadığından ek bir işleme ihtiyaç olmaz. Yöntemin dezavantajı ise tüm kesme enerjisi lazer ışını ile sağlandığından yalnızca ince sacların işlenmesi esnasında yakarak kesmede çıkılan hızlara ulaşılabilir. Diğer malzemelerde kesme hızı yakarak kesmeye göre %50 daha yavaştır [45,47].



Şekil 4.2. Azot gazı ile kesilmiş parça [38].

#### 4.2.2. Lazer ile Yakarak (Alevli) Kesim

Yöntemde yüksek saflıkta bulunan oksijen kesme gazı olarak kullanılır. Oksijenin yüksek saflıkta olması ile daha yüksek kesme hızı elde edilebilir ve daha yüksek kesme kalitesi elde edilebilir. Lazer ışını ve oksijen gazı yaklaşık 6 bar bir basınç ile malzeme üzerine üflenir. Malzeme yüzeyi tutuşma sıcaklığına getirilir. Tutuşma sıcaklığına getirilen metal oksijen gazı ile reaksiyona girerek yanar ve oksitlenme oluşur. Oksijenin kinetik etkisi sebebiyle cüruf püskürtülür ve kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Oksijen yanıcı özelliği sebebiyle meydana gelen ekzotermik reaksiyon ile kesme için gerekli enerjinin %40'ını sağlamış olur. Bu reaksiyon sebebiyle düşük lazer güçlerinde yüksek kesme hızlarına çıkılabilmektedir. Bu yöntemin dezavantajı ise kesme yüzeylerinde oluşan oksit tabakasıdır. Parçanın başka işlemlere tabi tutulması için oksit tabakasının kaldırılması gerekmektedir [45].

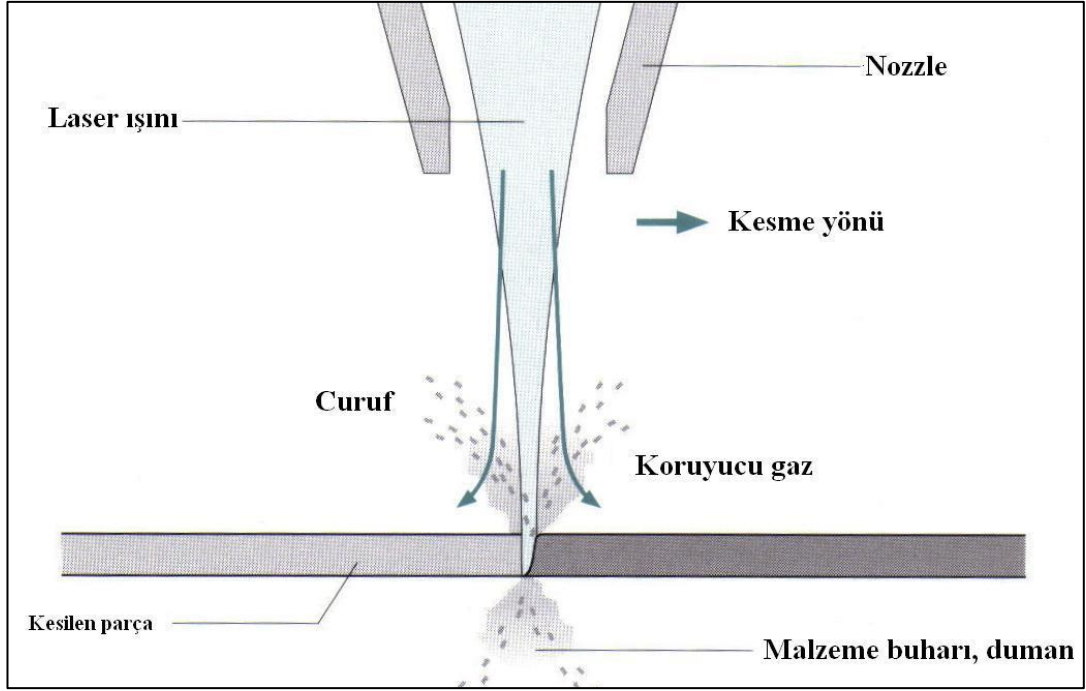


Şekil 4.3. Lazer ışını ile alevli kesme [48].

#### 4.2.3. Lazer Işını ile Buharlaştırarak Kesme

Yöntemde odaklanmış yüksek yoğunluktaki lazer ışını ile malzemenin bütün et kalınlığı kendiliğinden buharlaştırılır. Buharlaştıran malzeme, genleşme etkisi ve lazer ışınının yüksek kinetik enerjisi ile kesme yüzeyi bölgesinden püskürtülür [49].

Yöntemde kesme gazı olarak azot, argon ya da helyum kullanılır. Kullanılan gazlar kesilen yüzeyi oksit oluşumundan korur. Malzemeyi buharlaştırmak için daha yüksek güce ihtiyaç olduğundan daha yüksek lazer gücü gereklidir ve bu yöntem diğer yöntemlere oranla daha yavaştır. Bütün bunların yanı sıra çok yüksek bir kesme yüzey kalitesi elde edilmektedir ve ısı tesiri altındaki bölge oldukça dardır. Ahşap, seramik, kâğıt, plastik, deri ve ince metal levhaların kesimlerinde bu yöntem kullanılmaktadır [50].



Şekil 4.4. Lazer ışını ile buharlaştırarak kesme [48].

### 4.3. LAZERDE KULLANILAN KESME GAZLARI

Lazer ışınıyla kesme işlemlerinin düzgün bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için lazer ile kesme yöntemlerinin hepsi için uygun olan kesme gazının belirlenmesi ve bu uygun gazın işlemden kullanılması gerekmektedir. Kullanılan kesme gazı oluşan cürufu kesme bölgesinden uzaklaştırmalı ve odaklama merceğinin temiz kalmasını sağlamalıdır [51].

#### 4.3.1. Oksijen

Lazer ile yakarak (alevli) kesme işleminde oksijen kullanılmaktadır ve oksijen ile malzemenin reaksiyona girmesiyle çıkan ısı ile kesme hızı artmaktadır. Oksijenin saflığı bu yöntemde büyük bir öneme sahiptir. Saflık cüruf birikimi, çapak oluşumu ve kesme kalitesine etki etmektedir. Oksijenin saflığındaki çok küçük oranlarda meydana gelen bir azalma bile işlemdeki kesme hızında önemli miktarda bir düşüşe sebep olur. Yani oksijenin saflığı arttıkça kesme hızı artar. Ancak oksijen saflığının %99,6'dan

fazla olduđu durumlarda bile uygun kořulların sađlanmaması sebebiyle oksijenin saflığı dűşebilmekte ve kesim kalitesi kötűleşerek cűruf oluşumu gerçekteşebilmektedir [46].

#### **4.3.2. Azot ve Argon**

Lazer ışını ile buharlaştırarak veya eriterek kesme işlemlerinde eriyen ya da buharlaşan malzemenin kesme bölgesinden uzaklaştırılması sebebiyle reaksiyon hızı düşük gazlar kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle yöntemler için en uygun gazlar azot ve argon olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu gazlar ile kesme yüzeyinde oksit tabakası oluşumu engellenmekte ve kesme yarığında yanma oluşması önlenmektedir. Bu sayede kesme yüzeylerinde ilave bir oksit kaldırma işlemine gerek kalmamaktadır [51].

### **4.4. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ**

#### **4.4.1. Endűstriyel Çelikler**

Bu çeliklerde kesme gazı görevini oksijen görmektedir. Karbon yüzdesinde meydana gelen artış ile kesme kenarlarında sertleşme meydana gelir ve bu sertleşme köşelerde yanık izleri oluşmasına sebep olur. Oksijen kullanıldığından kesme bölgesinde az miktarda oksitlenme meydana gelmektedir. Kesme gazı olarak yüksek basınçta azot gazı kullanılması durumunda 4 mm'ye kadar kesim yapılabilir ve kesme bölgesinde oksitlenme oluşmaz. Ancak kesim hızı oksijenle kesime göre epeyce yavaştır. Geometrisi güç olan malzemelerin işlenmesinde lazer ünitesi darbeli olarak çalıştırılır. Malzeme yüzeylerinde kalan sıcaklığın kesimi olumsuz etkilemesi sebebiyle sıcaklık ve gerilmelerin giderilmesi gerekmektedir. Çeliklerin içerisindeki alaşım elementi miktarı önemlidir. Çelikler ihtiva ettikleri alaşımlara göre üçe ayrılır. Bunlar;

1. Yüksek alaşımlı çelikler
2. Dűşük alařımlı çelikler
3. Alaşımsız çelikler [46].



#### **4.4.2. Paslanmaz Çelik**

Bu çeliklerde kesme gazı olarak karbondioksit, azot ve helyum kullanılmaktadır. Kalınlıkları aynı olan paslanmaz çeliklerde basıncı yüksek olan azot, oksijen ve havaya kıyasla daha düzgün bir yüzey kalitesi ve daha hızlı bir kesim elde edilmesine olanak sağlar. Bu kesimde her kalınlık için farklı odak mesafesi seçilmesi gerekmektedir. Oksijen ve havanın yardımcı gaz olarak kullanıldığı kesimlerde istenilen ölçü tamlığı ve yüzey kalitesi elde edilemez [52].

#### **4.4.3. Alüminyum**

Alüminyum alaşımları yüksek yansıtma ve ısı iletkenlik özelliklerine sahiptir. Buna rağmen 6 mm kalınlığa kadar lazer ile kesim işlemi yapılabilmektedir. Bu malzemelerin sürekli mod ile kesilmesi gerekmektedir. Oksijen ve yüksek basınçlı azot yardımcı gazı kullanılarak kesimleri gerçekleştirilebilir [36].

#### **4.4.4. Titanyum**

Titanyum yapısından dolayı oksijen ve azot ile tepkimeye girme eğilimine sahiptir. Bu sebeple bu malzemenin kesilmesi için en uygun kesme gazı argondur [36].

#### **4.4.5. Bakır ve Pirinç**

Bakır ve pirinç malzemelerin ısı iletkenlikleri ve ısıyı yansıtma oranları yüksek olduğundan 3 mm ye kadar lazer ile kesimleri yapılabilmektedir. Bakırın kesimi için kesme gazı olarak oksijen kullanılırken pirinç malzemelerin kesiminde oksijen ve azot gazı yüksek basınç ile kullanılmaktadır [53].

#### **4.4.6. Sentetik Malzemeler**

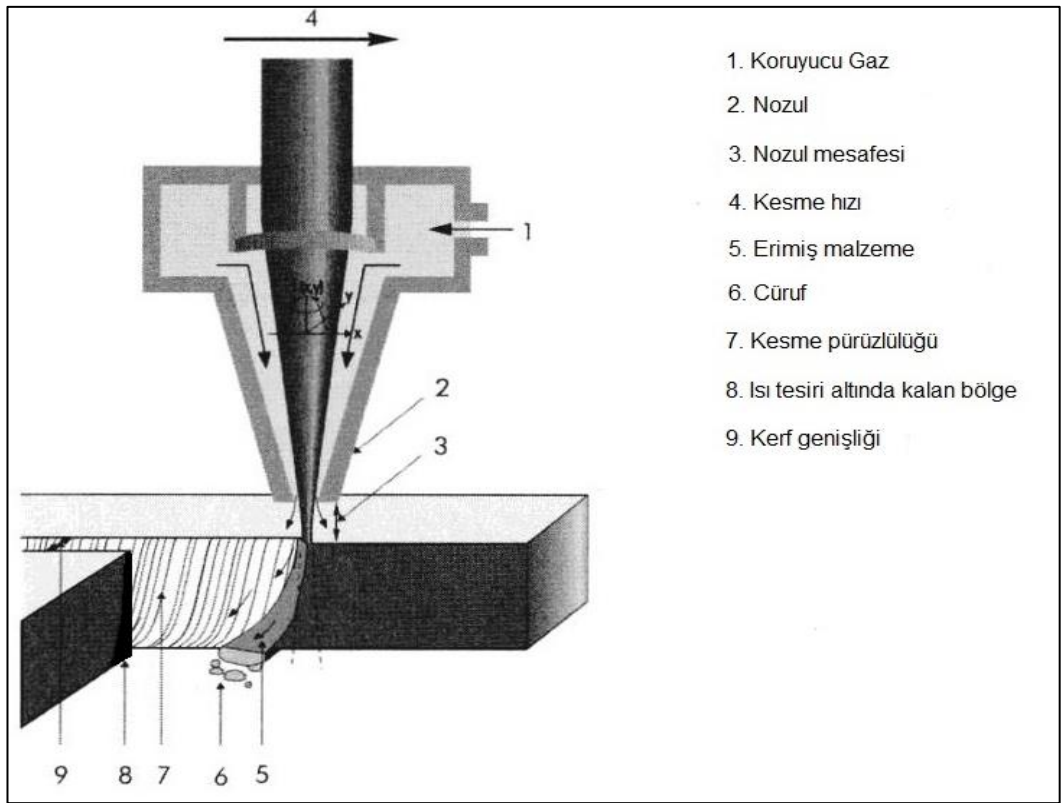
Sentetik malzemeler (termoplastik, sentetik kauçuk malzemeler) işlenirken çıkan dumanın yoğun olmasından dolayı işleme sırasında su jeti kullanılmalıdır ve kesme gazı olarak 0,5 bardan daha az basınca sahip azot kullanılır [52].

#### 4.4.7. Organik Malzemeler

Tahta, deri ve kâğıt gibi malzemelerde lazer ile işlenebilmektedir [52].

#### 4.5. LAZERLE KESME PARAMETRELERİ VE ÖZELLİKLERİ

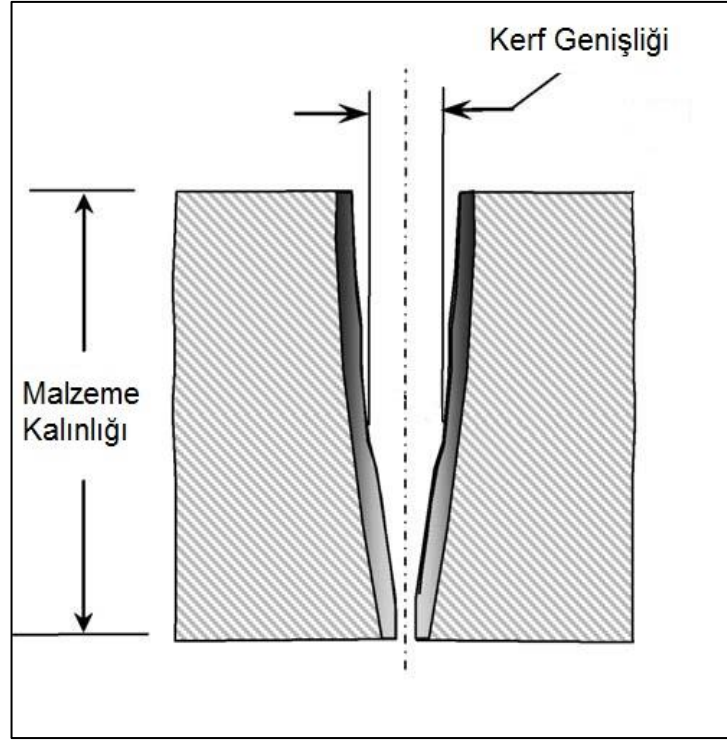
Lazer ile kesimin kalitesini tespit edebilmek için incelenen özellikler kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve ısı tesiri altında kalan bölgedir [54].



Şekil 4.5. Lazer kesme yüzey karakteristikleri [4].

#### 4.5.1. Kerf Genişliği

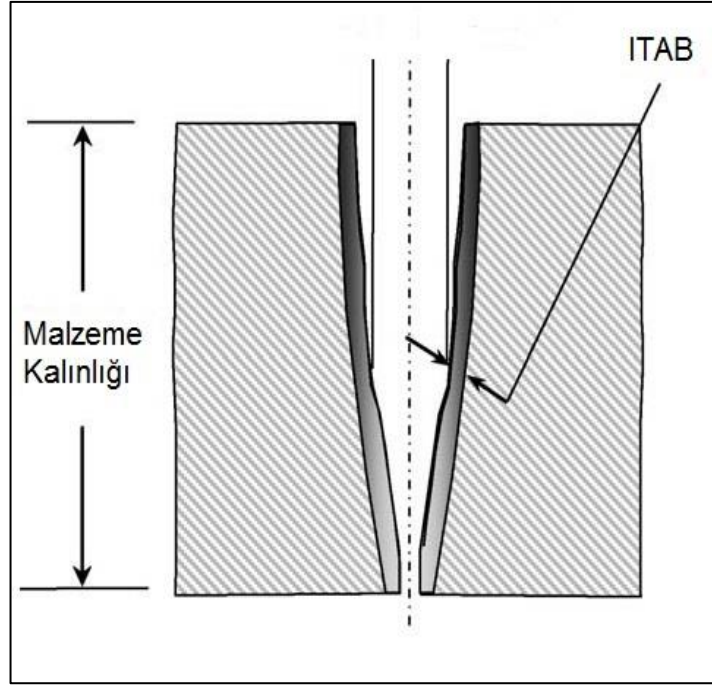
Lazer ile kesme işlemi sırasında oluşan yarığa kerf genişliği adı verilir ve malzemenin alt yüzeyinde daha dardır. Kerf genişliği iş parçasından çıkarılan malzemeyi göstermektedir ve çıkarılan malzeme ziyan olacağından her zaman için küçük değerlerde kerf genişliği arzu edilir [54].



Şekil 4.6. Kerf genişliği [4].

#### 4.5.2. Isı Tesiri Altında Kalan Bۆlge (ITAB)

Isı tesiri altında kalan bۆlge, ısının metalurjik yapıyı etkilediği ancak erimenin meydana gelmediği metal bۆlgesidir. Bu bۆlge lazer ile kesim esnasında kesme bۆlgesinin hemen yanında meydana gelir. Bu kısımdaki mikro yapıda meydana gelen değişimler kesme kalitesini belirlemede önemli özelliklerden biridir [54].



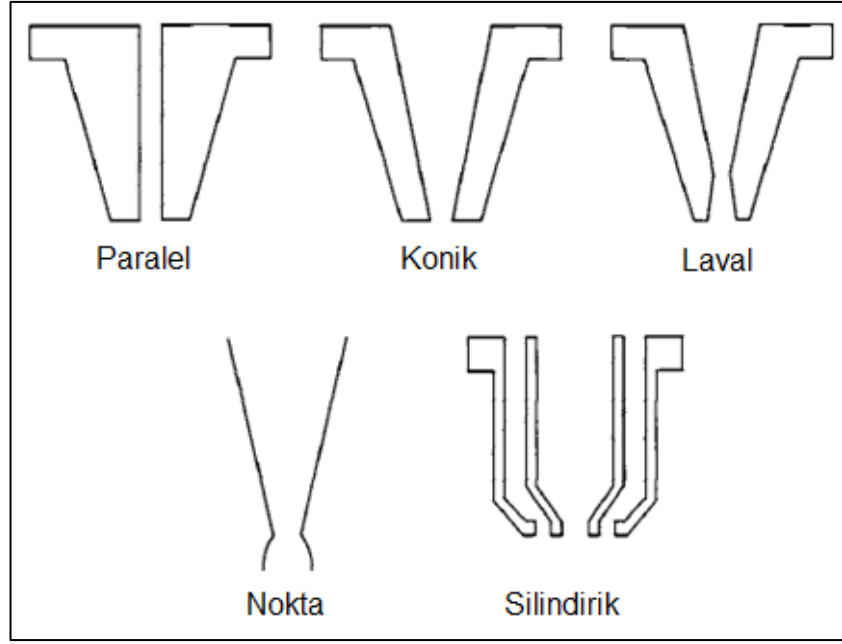
Şekil 4.7. Isı tesiri altında kalan bölge- ITAB [4].

#### 4.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Lazer ile kesilmiş malzemede yüzey düzensizliklerinin belirli bir biçim almış haline kesme yüzeyi denir. Lazer kesimin kalitesi malzemenin yüzeyine bakılarak belirlenebilir. Lazer ile kesilen malzemelerde kenarlar olukludur. Kesme hızı arttıkça oluklar kesme yönünden uzaklaşır. Yüzey pürüzlülük değerini belirlemek için Rz ortalama maksimum pürüzlülük ve Ra ortalama pürüzlülük parametreleri kullanılır [55].

#### 4.5.4. Nozul Tipleri

Nozul tasarımı, kesme gazının biçimini ve kesme kalitesini etkiler. Nozulun görevleri, basıncı azaltmak, iş parçasındaki gaz basıncını düzenlemek ve gaz akışının lazer ışını ile aynı ekseninde olmasını sağlamaktır. Yapılacak işlemin türüne göre birkaç farklı geometriye sahip nozul kullanılabilir. Bu nozulların en sık kullanılanları aşağıdadır [56].



Şekil 4.8. Nozul tipleri [56].

#### 4.5.5. Kesme Gazları

Kesme gazlarının lazer ile kesme işleminde önemli etkileri bulunmaktadır. Asal gazlar (örneğin; azot) cürufun iş parçasının alt kısmından atılmasını ve paslanmaz çelik ile nikel alaşımlı iş parçalarının yüksek kaliteler elde ederek kesilmesini sağlarlar. Aktif gazlar (örneğin; oksijen) iş parçası ile reaksiyona girer ve ince kesitli malzemelerin kesilmesi esnasında plazma oluşumunu önlerler. Paslanmaz çelikler ve düşük karbonlu çeliklerde, yüksek kesme hızı ve kesme kalitesinin istendiği yerlerde oksijen kullanılır. Titanyum alaşımlı malzemelerin kesilmesinde argon gazı kullanılırken çok yüksek kesme kalitesi istenen ya da oksijenin kullanılmaması gereken işlemlerde Helyum gazı kullanılır. Alüminyum, kompozit, cam gibi malzemelerde ise kesme işlemlerinde hava kullanılır. Gaz akışı yardımıyla lazer ile kesilen malzemelerdeki kesme bölgeleri soğutulur ve optik malzemeler cüruf sıçramalarından korunur. Yardımcı gazlar ile 10 mm üzerinde kalınlığa sahip olan malzemelerde hızın ve kalitenin yüksek olduğu kesimler yapmak mümkün hale gelir [56].

## 4.6. LAZER İLE KESME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI/DEZAVANTAJLARI

### 4.6.1. Lazer ile Kesimin Avantajları

1. Kalıp kullanılmadığından kalıp maliyeti yoktur.
2. Yüksek kesme hızı ile kesim yapılır.
3. Birçok malzeme türü lazerle kesilebilir.
4. Fire oranı minimum olduğundan maliyet düşüktür.
5. Isıdan etkilenen bölge küçük olduğundan malzemede pek bozulma görülmez.
6. Kesme sırasında malzeme ile temas bulunmadığından çiziksiz ürün üretimi gerçekleşir.
7. Bu yöntem ile sac malzemeler üzerine markalama yapılabilir.
8. Lazer kesim tezgâhlarında yüksek hassasiyet sağlanır. 0.05 mm hassasiyet ile kesim yapılabilir [34,36].

### 4.6.2. Lazerle Kesimin Dezavantajları

1. Bakım ve ilk kurulum maliyeti yüksek.
2. Programlama bilgisi ve nitelikli eleman gerektirir.
3. Kör delik açamaz.
4. Lazer parlak yüzeylerden yansır
5. Isıl işleminden dolayı malzemede kimyasal değişimler ve bozulmalar olur.
6. Sınırlı kalınlık/çap oranı vardır ( $H/D=10$ ) [36].

## BÖLÜM 5

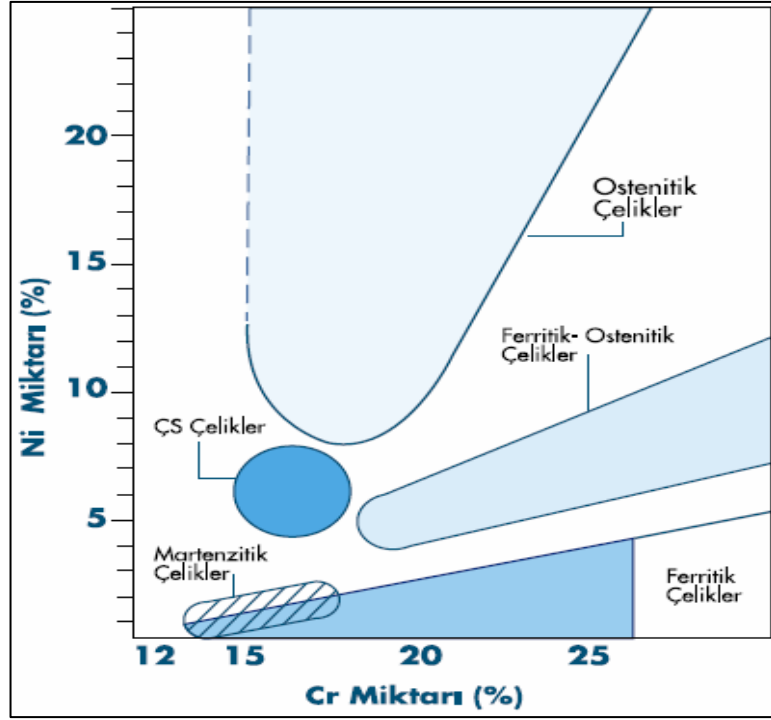
### PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelik, 1913 yılında, tüfek namluları için çeşitli metalleri birleştirerek deneyler yaparken bazılarının paslanmaya karşı dirençli olduklarını fark eden Harry Brearley tarafından keşfedilmiştir. Bu çelikler, içlerinde ağırlıkça en az %10,5 oranında krom (Cr) bulduran demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Yüzeylerinde oluşan yoğun ve ince krom oksit tabakası, korozyona karşı yüksek direnç sağlar ve oksidasyonun daha dibe doğru ilerlemesini engeller [57].

#### 5.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimlerdeki oranlar değiştirilerek farklı özellikte alaşımlar elde edilebilir. Molibden, nikel gibi alaşım elementleri eklenerek ya da krom oranı artırılarak korozyon direnci artırılabilir. Bunların dışında selenyum, alüminyum, titanyum, azot, kükürt, silisyum ve bakır gibi elementlerin ilave edilmesiyle korozyon dayanımına ek olarak başka özellikler de kazandırılabilir. Oluşturulan kimyasal bileşim değerlerine bakılarak imalatçılar ve tasarımcılar tarafından uygun malzeme seçilebilmektedir [57].

Paslanmaz çeliklerde içyapının belirlenmesi için önemli olan alaşım elementleri nikel, krom, mangan ve molibdendir. Bunlardan öncelikle Nikel ve krom içyapının östenitik veya ferritik olmasını belirler (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları.

Paslanmaz çelikler beş ana grupta toplanmaktadır.

1. Ferritik Paslanmaz Çelikler
2. Östenitik Paslanmaz Çelikler
3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler
4. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler
5. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Endüstride en yaygın olarak kullanılanlar ferritik ve östenitik çelikler olup, kullanımları bütün paslanmaz çelikler içinde %95'e ulaşır [57].





Şekil 5.2. Bazı paslanmaz çeliklerin iç yapıları [57].

### 5.1.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbonlu ve %10-30 krom içeren çeliklerdir. Başlıca alaşım elementi krom olmakla birlikte korozyon direncini yükseltmek için molibden, kaynak kabiliyetini yükseltmek içinde niyobyum, alüminyum ve titanyum kimyasal kullanılmaktadır [58].

Ferritik paslanmaz çelik grubunda tane iriliğinin, içyapı ve özellikler üzerinde tesiri dikkate alınmalıdır. Tane iriliğinin artmasıyla birlikte tokluk azalır. Buna karşın mukavemet düşük seviyede etkilenir. Ferritik kafes yapısında atom hareketlerinin daha rahat bir şekilde gerçekleşmesi, ferritik kromlu çeliklerin yüksek sıcaklıklarda Cr-Ni östenitik çeliklere nazaran seri bir şekilde tane büyüklüğünü göstermesi, ferritik çeliklerin işlenmesinde ve imalatında tokluk azalmasına neden olan tane büyüklüğünün göz önünde bulundurulmasını gerektirir. Bu açıdan, ferritik paslanmaz çeliklerin ısıl işlemleri ve sıcak şekil değiştirme işlemleri sıkı bir kontrol altında tutulmalıdır [59]. Ferritik paslanmaz çeliklerin en çok kullanılan tipleri 409, 410S ve 430'dür.

Başlıca Özellikleri:

1. Isıl işleme dayanımları artırılmaz ve sadece tavllanmış durumda kullanılırlar.
2. Ferritik grubun darbe dayanımı ve kaynak edilebilme kabiliyetleri düşüktür.
3. Manyetikler.
4. Östenitik çelikler kadar kolay şekillendirilemezler.

Ferritik paslanmaz çeliklerin kullanım alanlarına, otomobil şase parçaları, sıcak su tankları mutfak gereçleri, egzoz elemanları, çamaşır makinesi tamburları örnek olarak verilebilir.

### 5.1.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler %16-25 krom ve %7-20 nikel içeren üçlü nikel demir krom alaşımlarıdır. Bu alaşımların östenitik olarak adlandırılmalarının nedeni ısıl işlem sırasında yapılarının östenitik (YMK, demir tipi) yapıda kalmalarıdır. Bu alaşımlar esas olarak yüksek korozyon dirençlerinden ve kolay şekillenme özelliğinden dolayı pek çok mühendislik uygulamaları için arzu edilen özelliklere sahip olan çeliklerdir. 304, 310 ve 316 kalite paslanmaz çelikler bunların içinde en yoğun olarak kullanılanlardır. Bu çelikler hem yüksek sıcaklıklarda hem de çevre sıcaklıklarında uygulama alanları bulur [60].

Başlıca Özellikleri:

1. Mükemmel korozyon dayanımına ve kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler.
2. Hijyeniktirler, temizliği ve bakımı kolaydır.
3. Süneklik özellikleri yüksektir ve şekillendirilmeleri kolaydır
4. Düşük sıcaklıktaki darbe dayanımları iyidir.
5. Yüksek ve düşük sıcaklıklarda iyi mekanik özelliklere sahiptirler.
6. Manyetik değildirler (Tavllanmış halde).
7. Mekanik dayanımları sadece pekleşme ile artırılabilir [60].

Kimya endüstrisinde, uçak parçaları, makine ve imalat sanayinde, asansörler, antenler, mimari uygulamalar, bina ve dış cephe kaplamaları, mutfak gereçleri ve ekipmanları, jet motor parçaları, bilgisayar klavye yayları, gıda işleme ekipmanları östenitik paslanmaz çeliklerin yaygın olarak kullanım alanlarından bazılarıdır.

### **5.1.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler**

Martenzitik paslanmaz çeliklerin yapısında %12-18 krom ve %0,1'den fazla karbon bulunur. Bu çelikler yüksek sıcaklıklarda östenitik içyapıya sahiptirler. Çelikler, östenitik faza ulaştığı anda ve hızlı bir şekilde soğuma işlemine maruz kaldıklarında (sertleştirildiğinde), östenitik yapı martenzitik hale gelir. Östenitik yapı meydana getirmek için östenitleme sıcaklığı çeliğin türüne göre 950-1050 °C arasındadır. Ani soğutma ise alaşımsız çeliklere nazaran daha yavaş olabilir [61].

Ürün çeşidi açısından martenzitik çelikler yumuşak tavllanmış veya sertleştirilmiş bir şekilde temin edilirler. Martenzitik çeliklerin soğuk ve sıcak haddelenmiş bandlarına veya levhalarına, üreticisi tarafından sıcak veya soğuk bir şekilde son şekil verildikten sonra sertleştirme işlemi yapılır. Meneviş işlemi gerçekleştirildikten sonra malzemenin sertliği ve çekme mukavemeti azalır, akışmazlık değeri ise artar. Yeterli miktarda korozyona mukavemet ve yüzeyin istenilen özelliklere sahip olmasını sağlamak amacıyla asit işlemiyle temizlemek ya da ince bir taşlama işlemi yapmak yeterli olacaktır. Martenzitik paslanmaz çelikler aşınmaya karşı yüksek direnç göstermeleri ve kesici özellikleri ile çok geniş bir alanda kullanılırlar [61].

### **5.1.4. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler**

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin yapısında molibden, bakır, titanyum, alüminyum ve niyobyum gibi kimyasal elementler bulunur. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, bu elementlerin bir ya da birkaçının etkisiyle çökelme sertleşmesi gösteren Demir-Karbon-Nikel paslanmaz çelik grubunun bir üyesidir [59].

Bu çeliklere gerekli mukavemeti kazandırmak için kontrollü olarak yaşlandırma sertleşmesi (çökelme) uygulanmaktadır. Çökelti oluşumunu sağlamak için bakır, molibden, niyobyum, titanyum ve alüminyum elementleriyle alaşımlama yapılır [59].

Genel olarak çözeltili sertleşmesi, çözeltili alma tavından sonra uygulanan ani soğutmayla bir yaşlandırma işlemidir. Çeliğin yapısında bulunan kimyasal elementler, çözeltili alma tavi sırasında çözünürler ve sonrasında yaşlandırma işlemi esnasında mikro tanecikler halinde çökerek mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri arttırmaları. Bu işlemler sonucunda elde edilen paslanmaz çelik, martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerine ve östenitik paslanmaz çeliğin korozyon dayanımına sahip olabilmektedir. Bu çeliklerin mukavemetleri yaklaşık 1700 MP 'a kadar çıkabilmekte ve bu şekilde martenzitik paslanmaz çeliklerin mukavemetlerinin üzerindeki değerler elde edilmektedir [59].

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, pompa ve vana şaftlarda, yüksek hızlı uçakların dış yüzeylerinde, yakıt tanklarında, cıvata, somun, millerde vb. uygulama alanlarına sahiptir.

Başlıca Özellikleri:

1. Orta ve iyi derecede korozyon direnci vardır.
2. Mekanik dayanım özellikleri çok yüksektir.
3. Kaynak edilebilme kabiliyetleri iyidir.
4. Manyetikler.

#### **5.1.5. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler**

Bu çelik grubu ise yapısında hem ferritik hem de östenitik yapı olan çeliklerdir. Bu tip çeliklerin korozyona karşı gösterdikleri direnç içerdikleri alaşımlara göre değişiklik göstermektedir. Dupleks paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek bir mukavemete sahiptirler. Bunun sebebi %19 ila 28 arasında içerdikleri krom ve %5 oranına kadar sahip oldukları molibden değeridir [62]. Genellikle petrokimya

sanayi arıtma tesislerinde, jeotermal uygulamalarda, gemi ve yat endüstrisinde, yatların şaftlarında ve dümen millerinde, deniz veya off-shore teknolojisinde dubleks paslanmaz çelikler kullanılır.

Başlıca Özellikleri:

1. Yüksek gerilmeli korozyon direncine sahiptirler.
2. Kaynak edilebilirlik ve şekil alma kabiliyeti iyidir.
3. Östenitik ve ferritik çeliklere göre daha yüksek mekanik dayanım sağlarlar.

## BÖLÜM 6

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 6.1. DENEY NUMUNESİ

Deneysel çalışmalarda, farklı özelliklerdeki paslanmaz sac malzemeler kullanılarak CO<sub>2</sub> lazer kesim işlemi yapılmıştır. Deneyde kullanılan paslanmaz sac malzemelerin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2’ de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu.

Paslanmaz Sac Malzemelerin Kimyasal Bileşimi (%)									
Kalite	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
304	0,08	2,0	0,045	0,03	0,75	18-20	8-10	-	Kalan
310	0,08	2,0	0,045	0,03	0,75	25	20,5	0,75	Kalan
316	0,08	2,0	0,045	0,03	1,0	16-18	10-14	2,0-3,0	Kalan
430	0,12	1,0	0,045	0,03	1,0	16-18	0,75	-	Kalan

Çizelge 6.2. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

	Kopma mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Sertlik (Rockwell)
304	515-720	210 (min)	201
310	500-900	210 (min)	192
316	515	205	95
430	520	250	200

Bu deneysel çalışmada lazer ile kesme işleminde, boyutları 254x390x4 mm olan paslanmaz sac malzemeler dört farklı plaka şeklinde kullanılmıştır. Her bir plaka için basınç ve lazer ışının odak noktası sabit tutulmuş, malzemenin cinsi, kesme hızı ve frekans parametreleri çerçevesinde lazer ışını ile sırasıyla kesikler oluşturulmuştur.

## 6.2. LAZER TEZGÂHI

Bütün deneysel çalışmaların lazerle kesimi için Tektem Makina firmasındaki SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC Lazer Kesim tezgâhı kullanılmıştır (Şekil 6.1). Tezgâhın teknik özellikleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. SUNTOP ST-FC3015 Lazer tezgahının teknik parametreleri.

Özellikler	Parametreleri
Maksimum lazer gücü	800W
Lazer dalga boyu	1064 nm
Etkili işleme alanı	1500 x 3000 mm
X, Y eksenli tekrar konumlandırma hassasiyeti	$\pm 0,03$ mm
X / Y eksenli konumlandırma hassasiyeti	0,05 / m
Z eksenli rotası	120 mm
X / Y maksimum aksel hızlanma	1G
Maksimum yükleme ağırlığı	500 kg
Tüketilen toplam güç	$\leq 8$ kW
Yardımcı gaz	O <sub>2</sub>
Makine bütün ağırlığı	3500 kg
Maksimum malzeme kesme kalınlığı (Karbonlu sac malzemeler için)	10 mm
Maksimum malzeme kesme kalınlığı (Paslanmaz sac malzemeler için)	6 mm

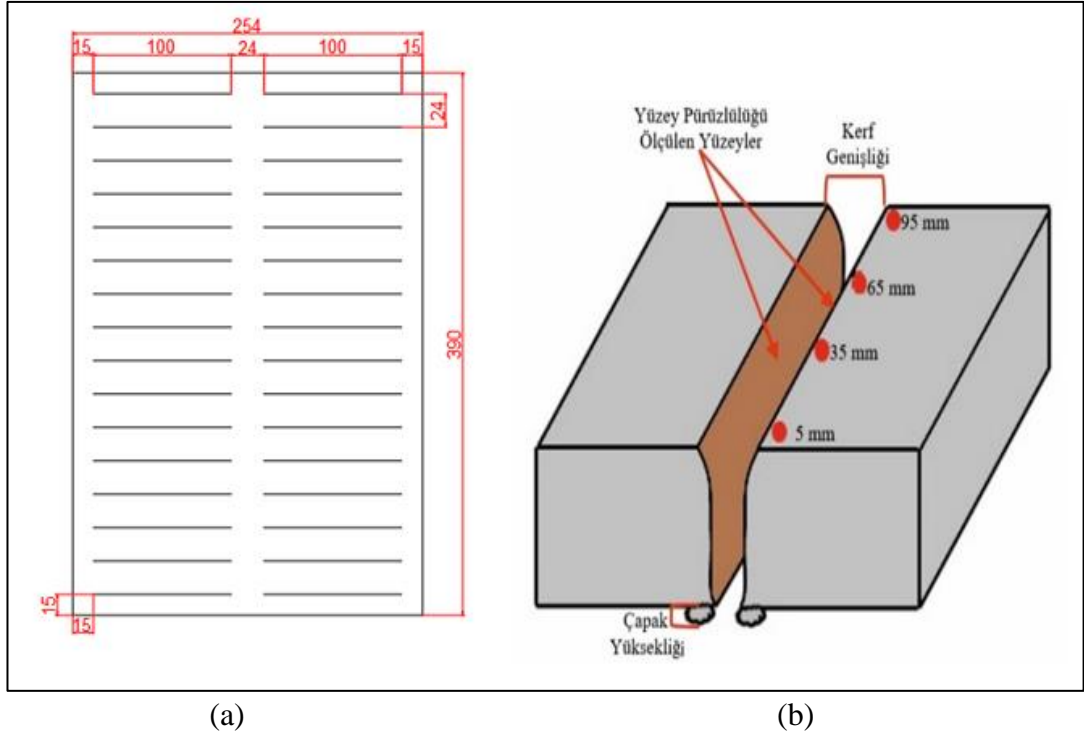


Şekil 6.1. Lazer kesme cihazı ve kontrol paneli (SUNTOP ST-FC 3015).

### 6.3. YÖNTEM

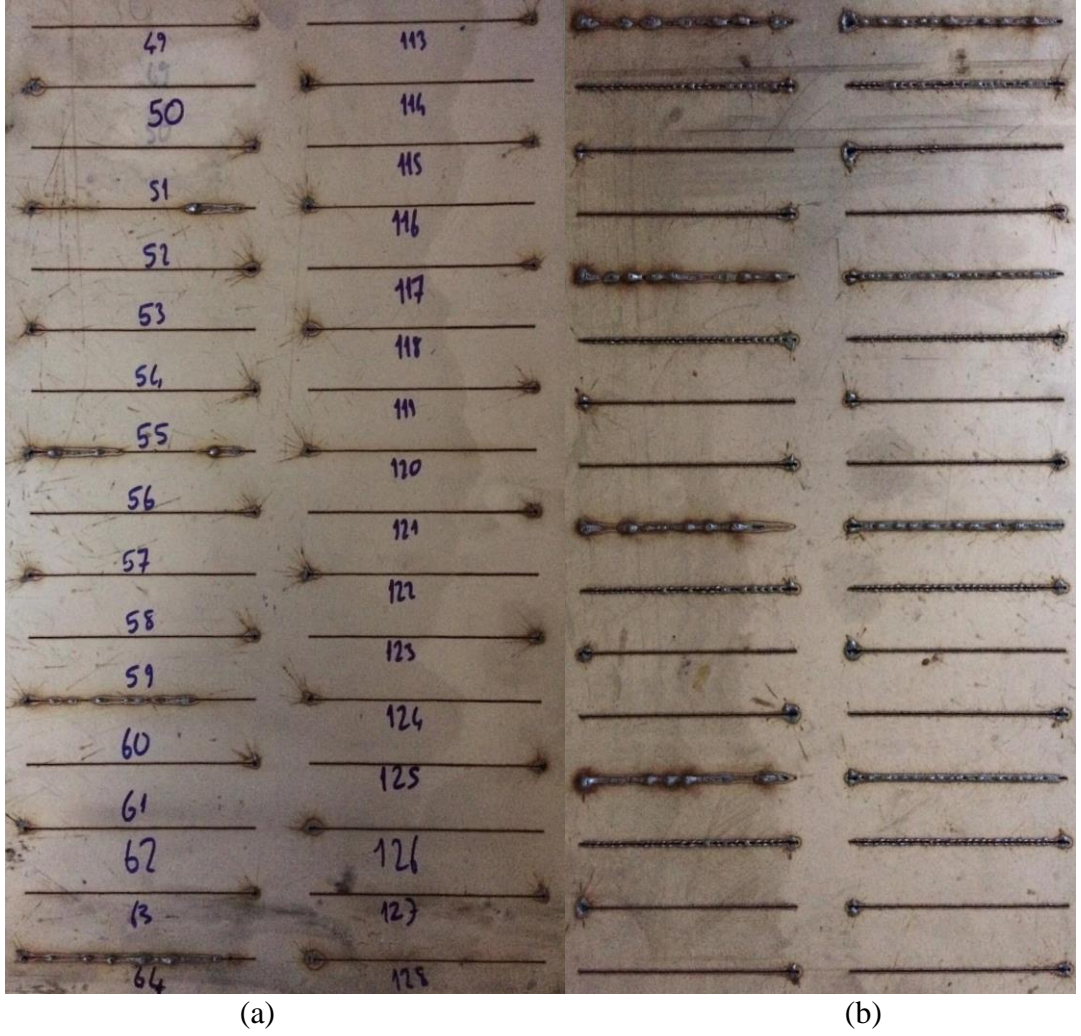
304-310-316 ve 430 olmak üzere dört farklı paslanmaz sac malzemedен elde edilen 4 mm kalınlığa sahip numuneler Şekil 6.2’de belirtilen ölçülerde kesme parametrelerini değiştirmek suretiyle lazer ile işlenmiştir.





Şekil 6.2. Sac lazer kesim ölçüleri a), numuneler üzerinden ölçüm yapılan konumlar b).

Lazer ile kesme yöntemi sırasında O<sub>2</sub> (Oksijen) gazı kullanılmıştır. Lazer kesim sırasında %100 güç yoğunluklu, 5" lens kullanılmıştır. Lazer ışınının çıkış noktası olan ucun çapı (nozzle) ise 2mm olarak seçilmiştir. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere yaklaşık 24 mm aralıklarla kesikler elde edilmiş, daha sonra her bir kesik sac malzemenin üzerinde numaralandırılmıştır. Her paslanmaz sac için 32 adet farklı parametrede lazer kesme deneyleri gerçekleştirilerek toplamda 128 adet deney yapılmıştır.



Şekil 6.3. Kesme işleminden görünüm a) Ön yüz, b) Arka yüz.

Numunelerin önce kerf genişliği ve daha sonra çapak yüksekliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonrasında numuneler giyotin makinesi kullanılarak kesilmiş ve 128 adet dikdörtgen numune elde edilmiştir. Daha sonra numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür.

#### 6.4. LAZER KESME PARAMETRELERİ

Dört farklı paslanmaz sac malzeme üzerinde gerçekleştirilen lazer kesme deneylerinde kesme gücü (800 W), nozul çapı (2 mm) ve odak noktası (0,8 mm) sabit tutulmuştur. Lazer kesme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 6.4' de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler.

Kesme Parametreleri	Seviyeler			
	1	2	3	4
Kesme Hızı, (mm/s)	20	24	28	32
Frekans (Hz)	3500	4000	4500	5000
Basınç (bar)	0,8	1	-	-

## 6.5. KERF GENİŞLİĞİ ÖLÇÜMÜ

Lazer ile işlenmiş olan numune yüzeylerinin kalitesini tespit etmek için kerf genişliği ölçümü yapılmıştır. Numunelerin kerf genişlikleri numune kesme işlemine başlanılan noktadan başlanarak 5 mm ve daha sonra 30 mm aralıklarla dört farklı noktadan (Şekil 6.2-b) alınan ölçümlerin ortalamaları ile hesaplanmıştır. Kerf genişliğinin ölçümünde Şekil 6.4’te verilen 1600x1200 çözünürlüğe sahip Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır.

## 6.6. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ ÖLÇÜMÜ

Çapak yüksekliği genel olarak talaşlı imalat açısından değerlendirildiğinde ürün kalitesi açısından önemli bir yere sahiptir. Bu durum bir diğer dinamik kesme prosedürüne sahip olan lazer teknolojisi ile ele alındığında, çalışılması zor fakat araştırılmaya da muhtaç bir şekilde kendini göstermektedir. Bu bağlamda, numunelerin çapak yüksekliği numune kesme işlemine başlandığı noktadan başlayarak 5 mm ve daha sonra 30 mm aralıklarla dört farklı noktadan (Şekil 6.2-b) alınan ölçümlerin ortalamaları ile hesaplanmıştır. Çapak yüksekliğinin ölçümünde Şekil 6.4’te verilen 1600x1200 çözünürlüğe sahip Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır.



Şekil 6.4. ISM-PM200SA dijital mikroskop.

## 6.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Lazer kesme işlemi yapılan numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek amacıyla DIN, ISO, ANSI parametreleri ölçebilen, otomatik kalibrasyon yapabilen, 17,5 mm tarama boyu seçimli Çizelge 6.5’te görülen Mitutoyo Surface SJ-210 model test cihazı kullanılmıştır. Her ölçümden sonra cihazın kalibrasyonu tekrar yapılmıştır. Kesme işlemi yapılan yüzeyler üzerinden alınan 4 farklı yüzey pürüzlülük değerinin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 6.5. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellik.

Tarama ucu	2 $\mu$ m	
Tarama boyu	17,5 mm	
Ölçüm aralığı	360 $\mu$ m	
Hareket	17.5 mm	
Ağırlık	500g	
Ölçüm kuvveti	0,75 mN	
Ölçüm metodu	İndüksiyon yöntemi	
Kızak yarı çapı	40 mm	
Ölçüm uzunluğu	1.75 mm, 5.6 mm, 17.5 mm	

## BÖLÜM 7

### DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

Bu deneysel çalışmada, AISI 304-316-430 paslanmaz sac malzemelerin CNC lazer ile kesilmesinde kritik öneme sahip olan frekans, kesme hızı ve basınç gibi işleme parametrelerinin kerf genişliği, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kerf genişliği, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüklerini belirlemek için ayrı ayrı en uygun parametreler belirlenmiştir. CNC lazer ile kesik elde etme işleminde işleme parametreleri giriş faktörleri, kerf genişliği, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü ise çıkış faktörleri olarak değerlendirilmiştir. Lazer ile kesme işlemi neticesinde elde edilen veriler, grafikler yardımıyla değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler, Çizelge 7.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1. Deney sonuçları.

Deney No	Malzeme Cinsi	Basınç (bar)	Frekans (Hz)	Kesme Hızı (mm/s)	Kerf Genişliği (mm)	Çapak yüksekliği (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
1	304	0,8	3500	20	2,32	1,75	7,5
2		0,8	3500	24	1,98	1,08	7,43
3		0,8	3500	28	1,56	0,45	6,9
4		0,8	3500	32	1,17	0,31	6,63
5		0,8	4000	20	2,35	1,64	6,95
6		0,8	4000	24	2,08	1,05	6,15
7		0,8	4000	28	1,76	0,46	6,09
8		0,8	4000	32	1,47	0,27	5,99
9		0,8	4500	20	2,43	1,55	6,2
10		0,8	4500	24	2,12	0,63	6,1
11		0,8	4500	28	1,92	0,46	5,89
12		0,8	4500	32	1,47	0,4	5,78

Çizelge 7.1. (devam ediyor).

13	304	0,8	5000	20	2,66	1,39	6,52
14		0,8	5000	24	2,44	0,44	5,68
15		0,8	5000	28	2,24	0,41	4,63
16		0,8	5000	32	1,69	0,28	4,1
17	310	0,8	3500	20	2,52	2,38	13,62
18		0,8	3500	24	1,78	1,66	11,84
19		0,8	3500	28	0,79	1,06	11,33
20		0,8	3500	32	0,87	0,88	10,23
21		0,8	4000	20	2,98	2,14	13,16
22		0,8	4000	24	1,69	1,09	11,38
23		0,8	4000	28	1,09	1,03	7,1
24		0,8	4000	32	0,95	0,78	6,8
25		0,8	4500	20	3,12	1,36	11,59
26		0,8	4500	24	2,08	1,03	7,68
27		0,8	4500	28	1,56	0,96	6,49
28		0,8	4500	32	1,24	0,37	4,35
29		0,8	5000	20	3,83	1,08	9,87
30		0,8	5000	24	2,93	0,98	7,35
31		0,8	5000	28	2,11	0,48	5,84
32		0,8	5000	32	1,64	0,19	3,84
33	316	0,8	3500	20	1,89	1,59	7,95
34		0,8	3500	24	1,36	0,93	7,8
35		0,8	3500	28	0,78	0,77	6,84
36		0,8	3500	32	0,45	0,41	6,82
37		0,8	4000	20	2,01	1,58	7,12
38		0,8	4000	24	1,79	0,91	6,86
39		0,8	4000	28	1,26	0,61	6,47
40		0,8	4000	32	1,04	0,38	6,32
41		0,8	4500	20	2,31	1,46	6,89
42		0,8	4500	24	2,07	0,82	6,25
43		0,8	4500	28	1,81	0,53	6,11
44		0,8	4500	32	1,61	0,27	5,79
45		0,8	5000	20	2,96	1,23	6,47
46		0,8	5000	24	2,78	0,63	5,22
47		0,8	5000	28	2,41	0,44	5,15
48		0,8	5000	32	2,03	0,25	4,48
49	430	0,8	3500	20	1,78	1,52	11,84
50		0,8	3500	24	1,54	0,87	9,77
51		0,8	3500	28	1,29	0,57	8,85
52		0,8	3500	32	0,92	0,38	7,98
53		0,8	4000	20	2,21	1,43	10,22
54		0,8	4000	24	1,95	0,81	7,69

Çizelge 7.1. (devam ediyor).

55		0,8	4000	28	1,67	0,46	7,57
56		0,8	4000	32	1,31	0,37	6,43
57		0,8	4500	20	2,86	1,37	8,42
58		0,8	4500	24	2,47	0,71	7,69
59		0,8	4500	28	1,81	0,43	6,41
60		0,8	4500	32	1,52	0,23	6,19
61		0,8	5000	20	3,28	1,22	7,86
62		0,8	5000	24	3,14	0,57	5,91
63		0,8	5000	28	2,93	0,42	4,84
64		0,8	5000	32	2,76	0,2	4,14
65	304	1	3500	20	2,43	1,28	9,08
66		1	3500	24	2,22	0,47	7,89
67		1	3500	28	1,79	0,44	7,02
68		1	3500	32	1,33	0,33	6,19
69		1	4000	20	2,52	1,18	8,07
70		1	4000	24	2,27	0,54	7,33
71		1	4000	28	1,91	0,34	6,98
72		1	4000	32	1,7	0,31	6,46
73		1	4500	20	2,68	1,12	6,81
74		1	4500	24	2,39	0,44	6,56
75		1	4500	28	2,05	0,25	6,54
76		1	4500	32	1,72	0,22	6,3
77		1	5000	20	2,81	1,08	6,56
78		1	5000	24	2,62	0,49	6,12
79		1	5000	28	2,18	0,29	5,88
80		1	5000	32	1,88	0,21	5,5
81	310	1	3500	20	2,71	3,05	8,33
82		1	3500	24	2,35	2,02	6,92
83		1	3500	28	1,96	1,82	4,9
84		1	3500	32	1,23	1,67	4,4
85		1	4000	20	3,16	2,16	8,26
86		1	4000	24	2,66	1,78	5,44
87		1	4000	28	2,43	1,38	4,61
88		1	4000	32	1,76	0,97	3,68
89		1	4500	20	3,34	2,07	7,88
90		1	4500	24	2,91	1,54	5,42
91		1	4500	28	2,68	1,23	4,51
92		1	4500	32	2,36	0,79	3,44
93		1	5000	20	4,09	1,79	6,55
94		1	5000	24	3,48	1,39	5,36
95		1	5000	28	3,13	1,07	3,93
96		1	5000	32	2,7	0,34	2,78

Çizelge 7.1. (devam ediyor).

97	316	1	3500	20	2,14	1,74	9,48
98		1	3500	24	1,62	1,22	7,96
99		1	3500	28	1,14	0,91	7,32
100		1	3500	32	0,77	0,61	6,3
101		1	4000	20	2,42	1,62	7,86
102		1	4000	24	2,18	1,02	7,33
103		1	4000	28	1,68	0,84	6,8
104		1	4000	32	1,45	0,52	5,11
105		1	4500	20	2,71	1,54	6,61
106		1	4500	24	2,41	0,97	5,9
107		1	4500	28	2,19	0,62	5,79
108		1	4500	32	2,07	0,46	5,15
109		1	5000	20	3,24	1,33	6,88
110		1	5000	24	2,86	0,74	5,86
111	1	5000	28	2,61	0,56	5,45	
112	1	5000	32	2,47	0,37	5,01	
113	430	1	3500	20	1,96	1,79	12,43
114		1	3500	24	1,78	1,04	11,8
115		1	3500	28	1,44	0,66	10,5
116		1	3500	32	1,14	0,61	10,35
117		1	4000	20	2,43	1,54	11,15
118		1	4000	24	2,05	0,87	10,1
119		1	4000	28	1,83	0,63	9,95
120		1	4000	32	1,52	0,38	7,2
121		1	4500	20	2,86	1,46	12,1
122		1	4500	24	2,37	0,85	8,39
123		1	4500	28	1,91	0,54	7,54
124		1	4500	32	1,79	0,41	6,42
125		1	5000	20	3,41	1,31	7,61
126		1	5000	24	2,92	0,79	6,53
127		1	5000	28	2,41	0,48	6,24
128		1	5000	32	2,11	0,37	5,75

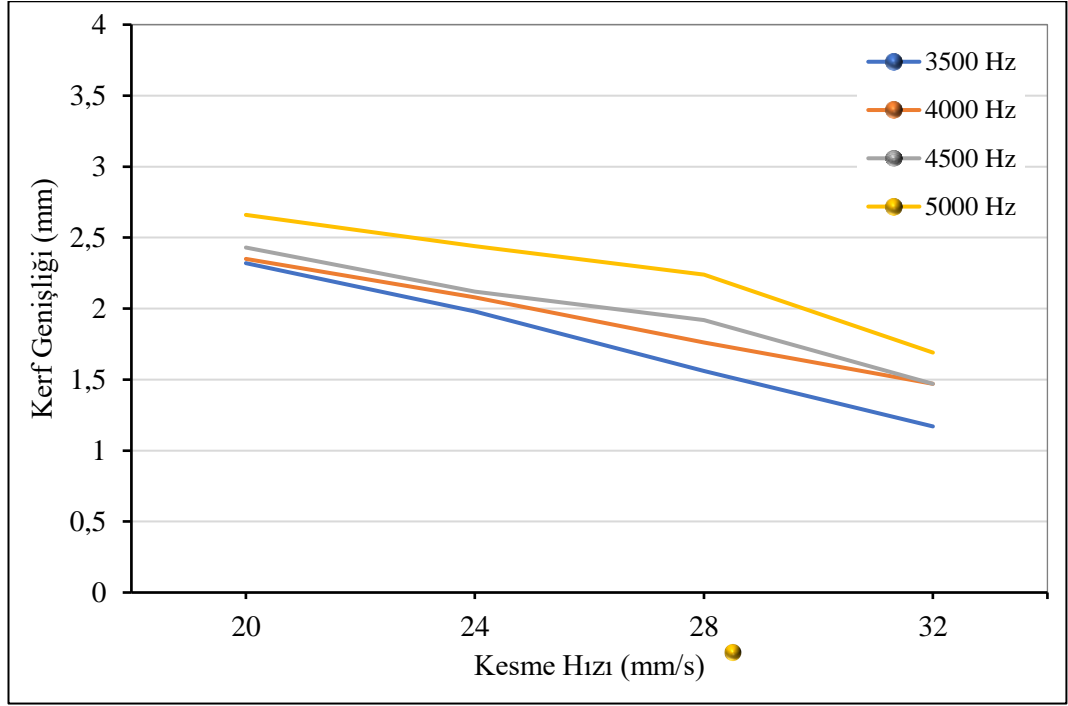
## 7.1. KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

AISI 304-310-316-430 paslanmaz sac malzemelerinin lazerle işlenmesinde kerf genişliğinin ölçümleri, kesme işleminin başlangıç noktasından kesme işleminin son bulunduğu noktaya kadar farklı noktalardan alınan ölçümlerin ortalama değerleri ile belirlenmiştir. Deneyler iki farklı basınçta, dört farklı kesme hızında ve dört farklı



frekans değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda iki farklı basınçta kesme hızının ve frekansın kerf genişliklerine etkileri Şekil 7.1-7.8’de verilmiştir.

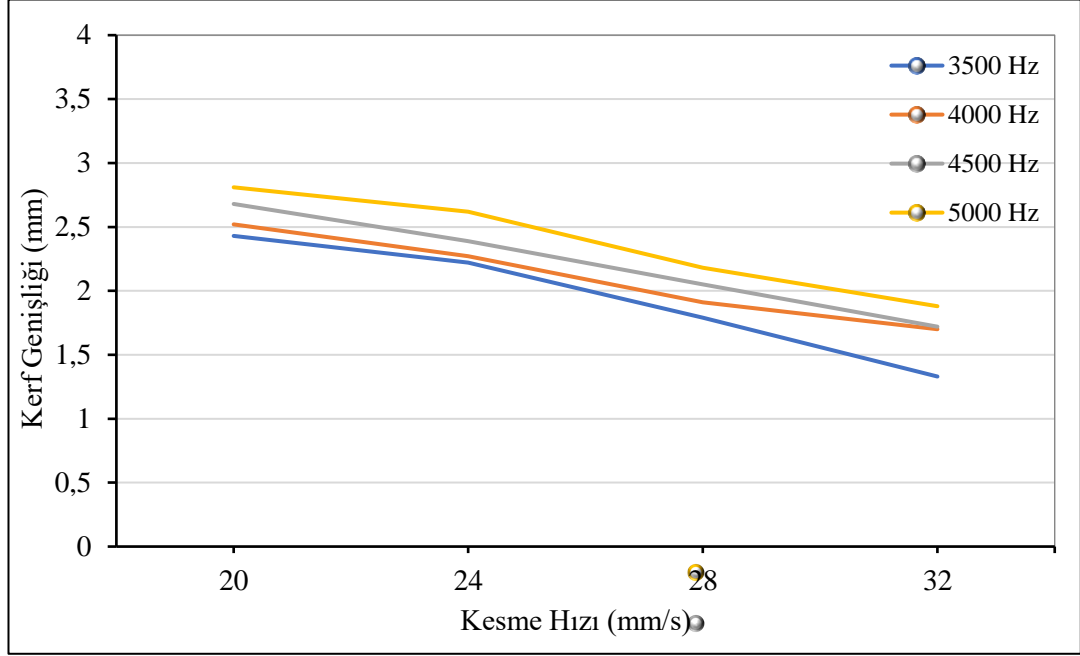
Şekil 7.1’de görüldüğü gibi, AISI 304 paslanmaz sacın 0,8 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2,32 mm olmuştur. Frekans değerlerinin 4000, 4500 ve 5000 Hz çıkarılması ile kerf genişlikleri artarak sırası ile 2,35 mm, 2,43 mm ve 2,66 mm değerleri ölçülmüştür. Kesme hızının 32 mm/s kadar artması ile bütün frekans değerlerinde kerf genişliğinde düzenli bir azalma tespit edilmiştir. 32 mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerinde kerf genişliği %49,57 azalarak 1,17 mm ile en düşük kerf değeri ölçülmüştür.



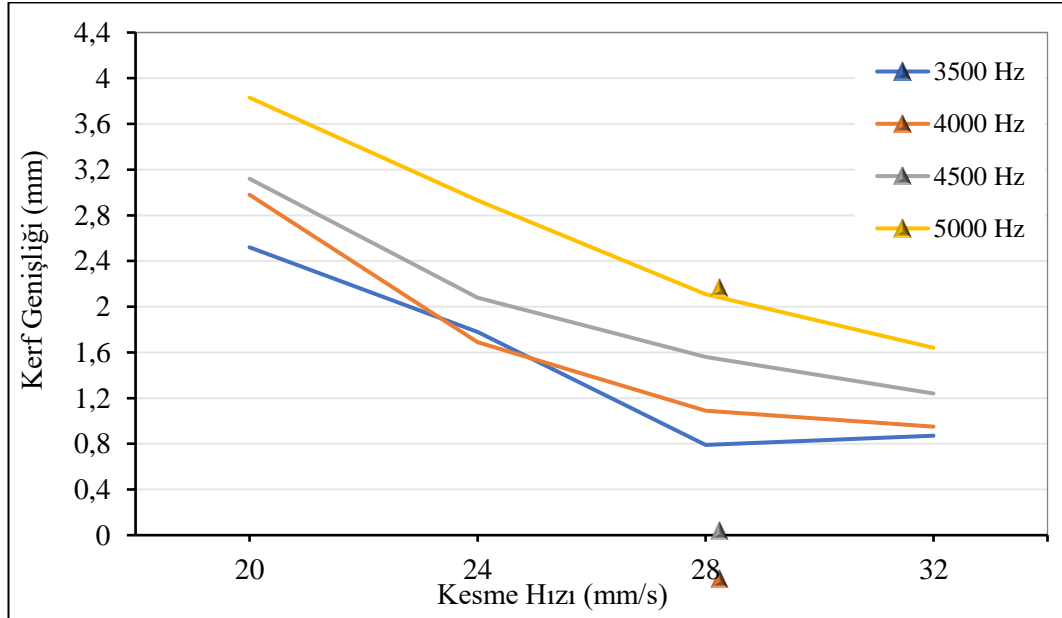
Şekil 7.1. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

Şekil 7.2’de görüldüğü gibi, AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2,43 mm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekans değerlerinin ortalama %14,28 (4000 Hz), %28,57 (4500 Hz) ve %42,85 (5000 Hz) oranlarında artırılması ile kerf genişliklerinde sırası ile %3,70 %10,28 ve %15,64 oranlarında artma görülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 1 bar

basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan değerlerde en düşük kerf genişliği 1,33 mm ölçülmüştür.



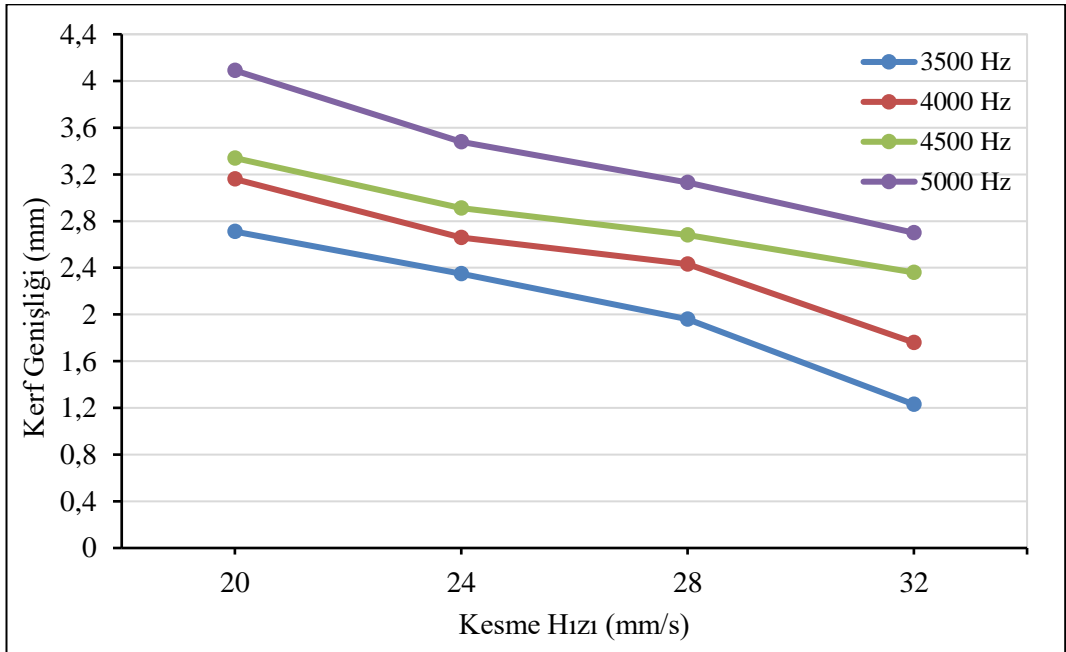
Şekil 7.2 AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.



Şekil 7.3. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

Şekil 7.3'te görüldüğü gibi, AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2,52 mm olmuştur. Frekans değerlerinin 4000, 4500 ve 5000 Hz çıkarılması ile kerf genişlikleri artarak sırası ile 2,98 mm, 3,12 mm ve 3,83 mm değerleri ölçülmüştür. 28mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerinde kerf genişliği %68,65 azalarak 0,79 mm ile en düşük kerf değeri ölçülmüştür.

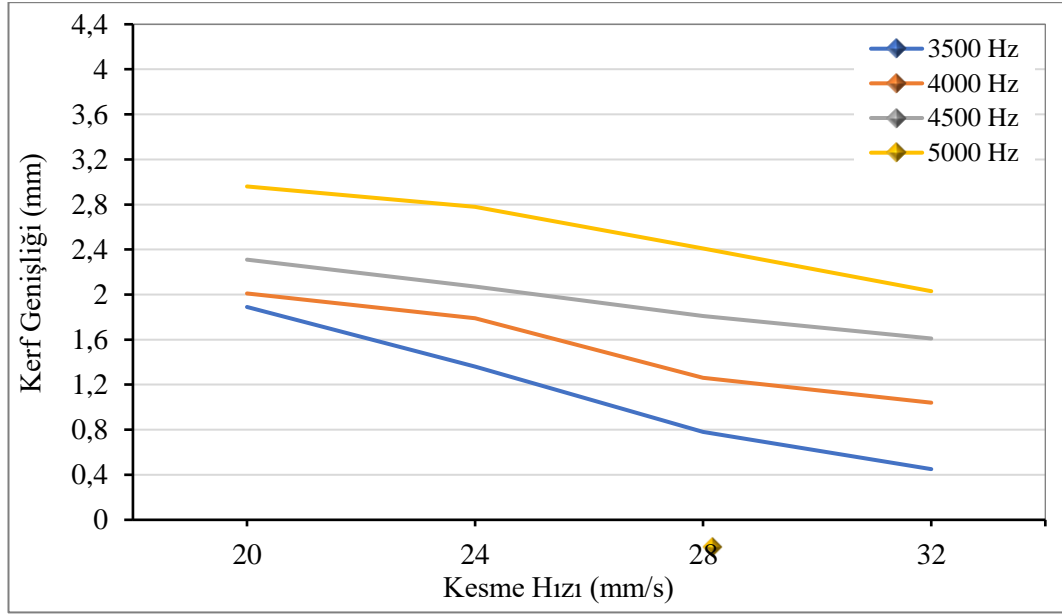
Şekil 7.4'te görüldüğü gibi, AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2,71 mm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında, frekans değerlerinin ortalama %14,28 (4000 Hz), %28,57 (4500 Hz) ve %42,85 (5000 Hz) oranlarında artırılması ile kerf genişliklerinde sırası ile %16,6 %23,25 ve %50,92 oranlarında artma görülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 1 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan değerlerde en düşük kerf genişliği 1,23 mm ölçülmüştür.



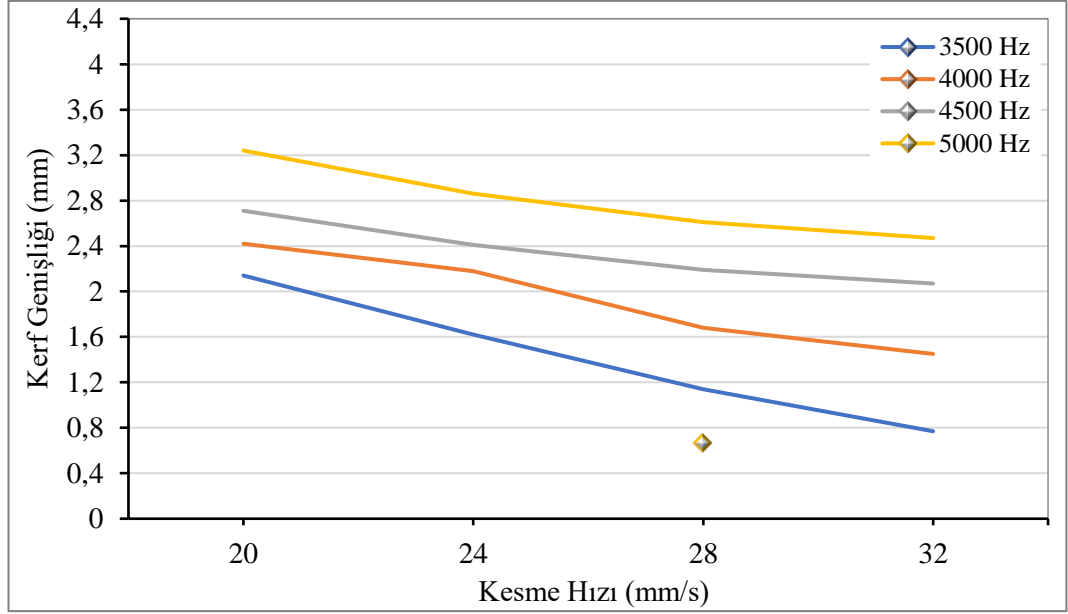
Şekil 7.4. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

Şekil 7.5'te görüldüğü gibi, AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 1,89 mm

olmuştur. Frekans değerlerinin 4000, 4500 ve 5000 Hz çıkarılması ile kerf genişlikleri artarak sırası ile 2,01 mm, 2,31 mm ve 2,96 mm değerleri ölçülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 32mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerinde kerf genişliği %76,19 azalarak 0,45 mm ile en düşük kerf değeri ölçülmüştür.



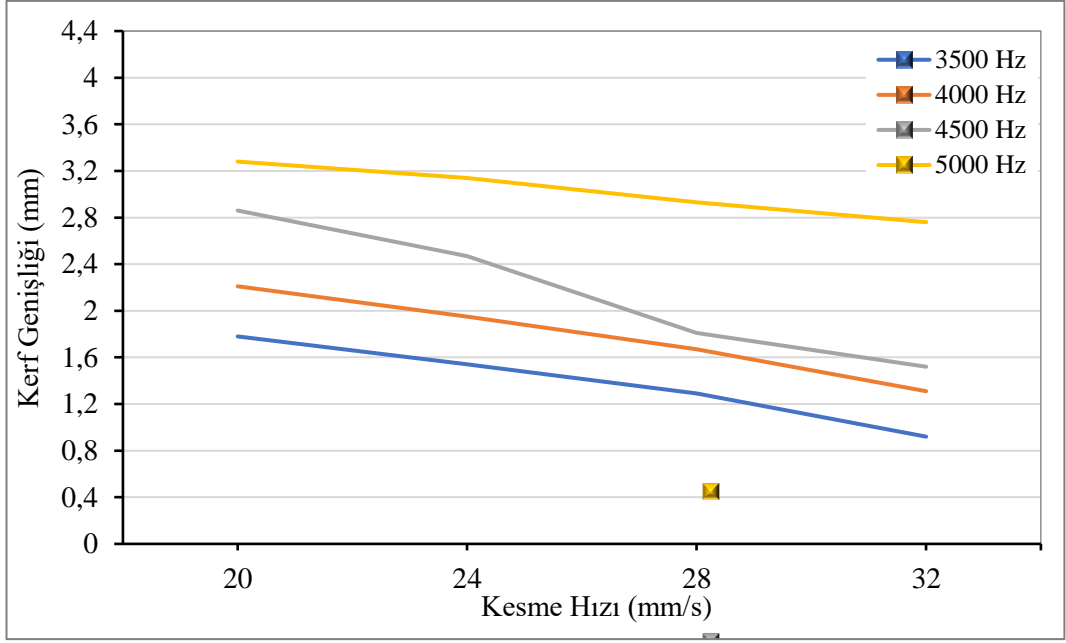
Şekil 7.5. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.



Şekil 7.6. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

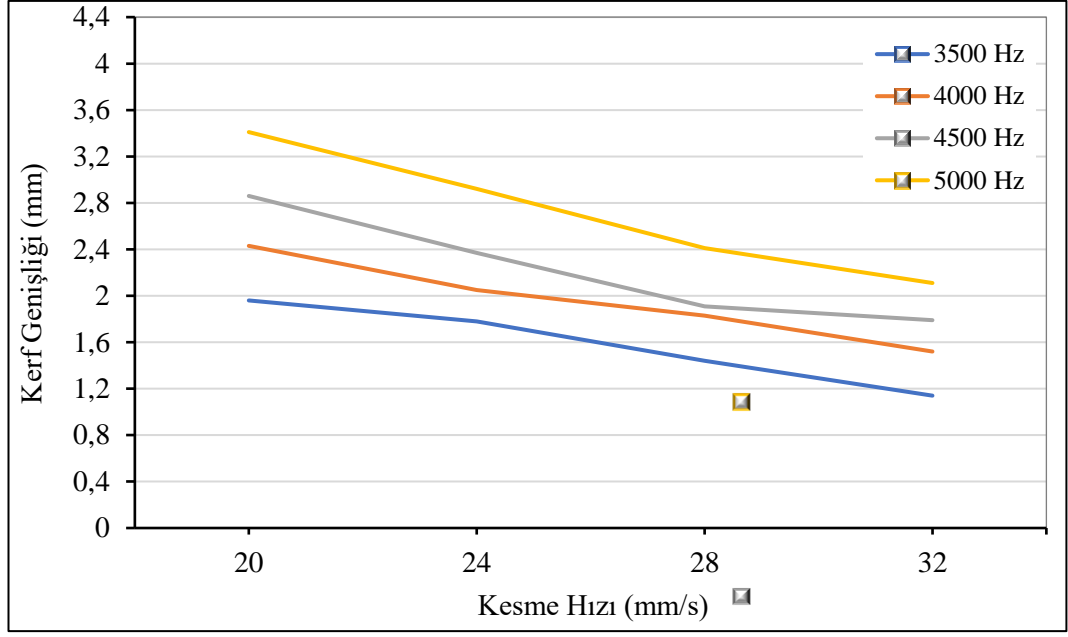
Şekil 7.6'da görüldüğü gibi, AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 2,14 mm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekans değerlerinin ortalama %14,28 (4000 Hz), %28,57 (4500 Hz) ve %42,85 (5000 Hz) oranlarında artırılması ile kerf genişliklerinde sırası ile %13,08 %26,64 ve %51,40 oranlarında artma görülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 1 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan değerlerde en düşük kerf genişliği 0,77 mm ölçülmüştür.

Şekil 7.7'de görüldüğü gibi, AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 1,78 mm olmuştur. Frekans değerlerinin 4000, 4500 ve 5000 Hz çıkarılması ile kerf genişlikleri artarak sırası ile 2,21 mm, 2,86 mm ve 3,28 mm değerleri ölçülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 32mm/s kesme hızında 3500 Hz frekans değerinde kerf genişliği %48,31 azalarak 0,92 mm ile en düşük kerf değeri ölçülmüştür.



Şekil 7.7. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

Şekil 7.8’de görüldüğü gibi, AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerlerinde kerf genişliği 1,96 mm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekans değerlerinin ortalama %14,28 (4000 Hz), %28,57 (4500 Hz) ve %42,85 (5000 Hz) oranlarında artırılması ile kerf genişliklerinde sırası ile %23,98 %45,92 ve %73,98 oranlarında artma görülmüştür. Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinde azalma görülmüştür. 1 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan değerlerde en düşük kerf genişliği 1,14 mm ölçülmüştür.



Şekil 7.8. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı kerf genişliği değişimleri.

Bütün frekans değerlerinde kesme hızının artması ile kerf genişliklerinin azaldığı görölmüŐtür. Örneğin, AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde yapılan değerlerde en düşük kerf genişliği 1,33 mm ölçölmüŐtür. Yapılan deneylerde frekans değerlerinin artırılması daha büyük kerf genişliğinin oluşmasına neden olmuştur. Diğer taraftan kesme hızındaki artışın kerf genişliğinin azalmasına yol açtığı görölmüŐtür, bu da literatürle paralellik arz etmektedir [63]. Bütün grafikler incelendiğinde, en küçük kerf genişliği AISI 316 paslanmaz sac malzemesinde 0,8 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta 0,45 mm olmuştur. En büyük kerf genişliği ise AISI 310 paslanmaz sac malzemesinde 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta 4,09 mm olarak ölçölmüŐtür.

Bu sonuçlar çerçevesinde; AISI 304 paslanmaz sac malzemesi için en küçük kerf genişliği 0,8 bar basınç değeri, 3500 Hz frekansı ve 32 mm/s kesme hızı olan işleme parametrelerinde 1,17 mm ölçölmüŐtür. Bunun yanı sıra en büyük kerf genişliği ise 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 2,81 mm olarak tespit edilmiştir. AISI 310 paslanmaz sac malzemesi için en küçük kerf genişliği; 0,8 bar basınç, 3500 Hz frekans ve 28 mm/s kesme hızı olan parametrelerde 0,79 mm

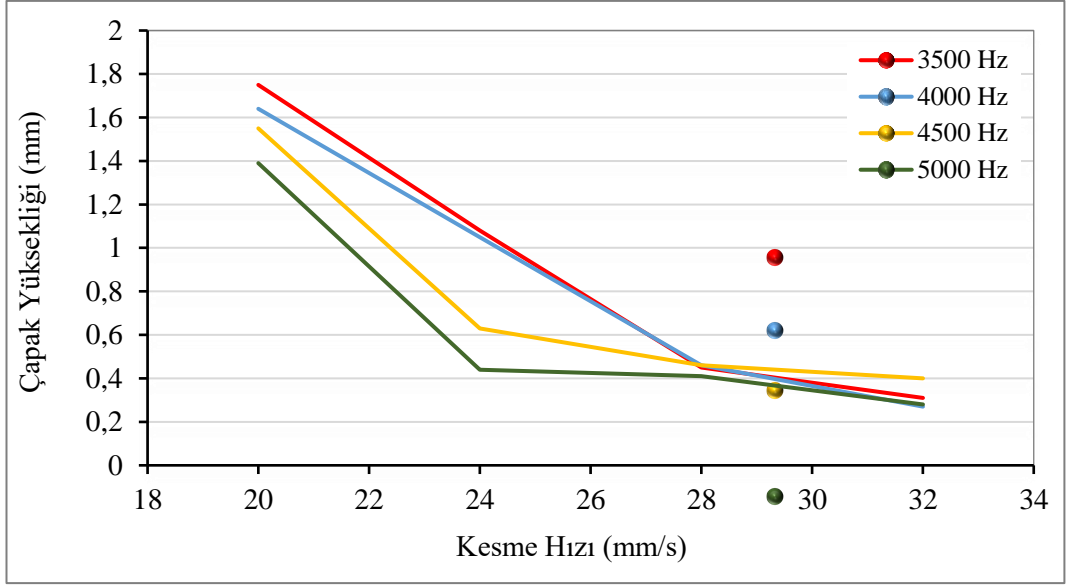
olmuştur. En büyük kerf genişliği ise 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 20mm/s kesme hızında 4,09 mm olarak ölçülmüştür. AISI 316 paslanmaz sac malzemesi için en küçük kerf genişliği; 0,8 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 0,45 mm iken, en büyük kerf genişliği ise 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 3,24 mm olarak ölçülmüştür. AISI 430 paslanmaz sac malzemesi için en küçük kerf genişliği; 0,8 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 0,92 mm ölçülürken, en büyük kerf genişliği ise 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 3,41 mm olarak ölçülmüştür.

## **7.2. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

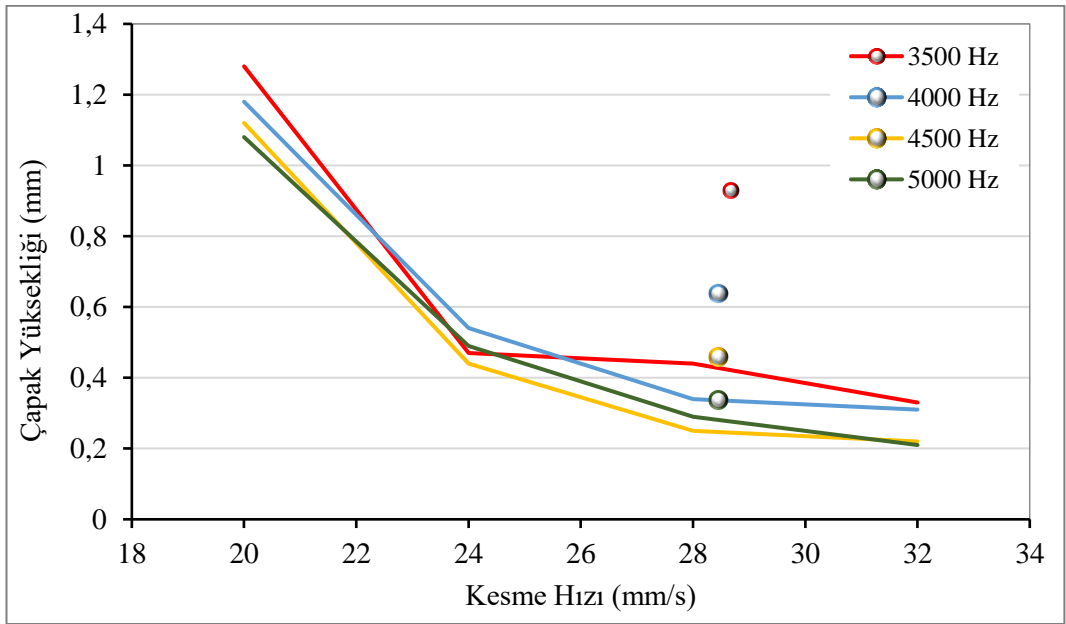
Lazer ile kesme işleminde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise çapak oluşumudur. Çapak oluşumu iş parçasının lazer ile kesme koşullarında, iş parçasının geometrik özelliklerine bağlı olarak birçok parametreden etkilenmektedir. İmalat açısından çapak oluşumunu etkileyen parametreleri en iyi şekilde anlayabilmek oldukça karmaşık bir durumdur. Fakat çapak oluşumunu var olan yöntemlerle yorumlayabilmek düşünce oluşturması açısından oldukça önemlidir [64]. Bu sebeple, lazer ile kesme işlemi sonrasında malzemelerin kenarlarında oluşan çapakların yükseklik değerleri ölçülmüş ve işleme parametrelerinin çapak oluşumlarına etkisi hakkında fikir oluşturulmaya çalışılmıştır.

Şekil 7.9’da AISI 304 paslanmaz sac malzemesinde 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılmasının çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 4000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,27 mm olurken, kesme hızının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 1,75 mm ölçülmüştür. Ancak 28 mm/s ve 32 mm/s kesme hızlarında, bütün frekans değerlerinde çapak yükseklikleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Kesme hızının sırası ile 20 mm/s’den 24 mm/s’ye çıkarılması ile çapak yüksekliklerinde yüksek oranlarda düşüş olduğu görülmüştür.





Şekil 7.9. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

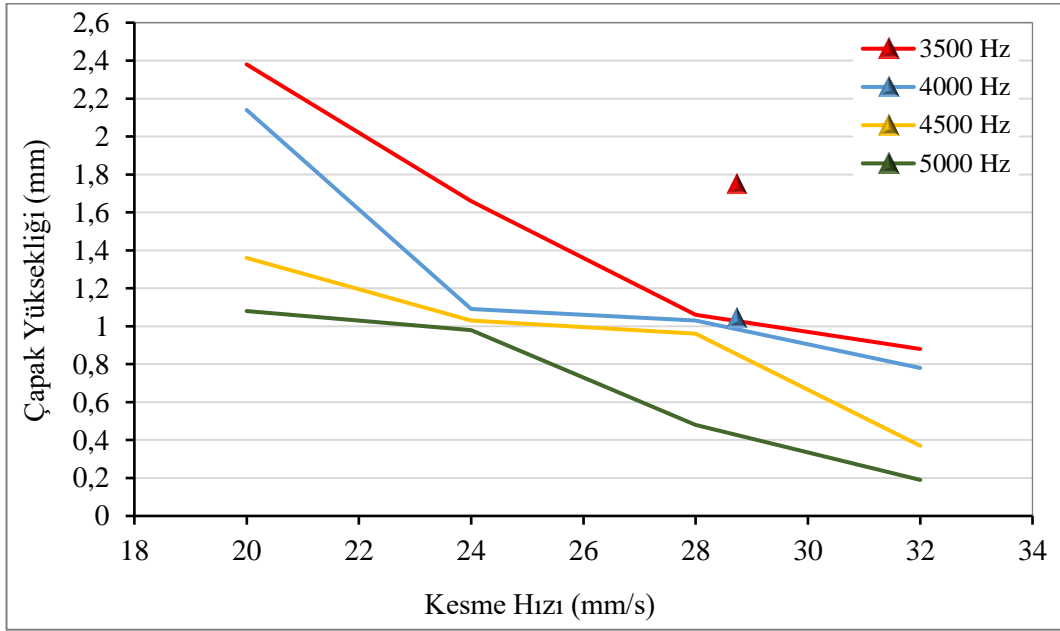


Şekil 7.10. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

Şekil 7.10'de AISI 304 paslanmaz sac malzemesinde 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılmasının çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,21 mm ile en düşük çapak yüksekliği ölçülmüştür. Kesme hızının 20 mm/s kadar düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerinde çapak yüksekliği ortalama %509,53 oranında artarak 1,28

mm çıkmıştır.32 mm/s kesme hızında bütün frekanslarda en düşük çapak yüksekliği görülmektedir.

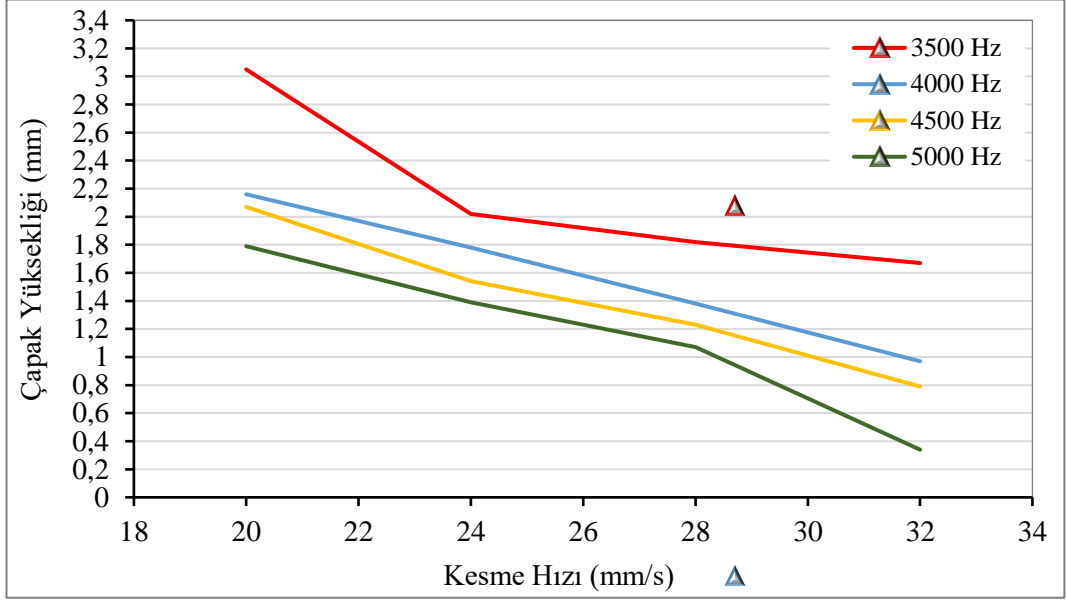
Şekil 7.11’de AISI 310 paslanmaz sac malzemesinde 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılmasının çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,19 mm olurken, kesme hızınının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 2,38 mm ölçülmüştür. 32 mm/s kesme hızında bütün frekanslarda en düşük çapak yüksekliği görülmektedir. Kesme hızı ve frekans arttıkça çapak yüksekliklerinde yüksek oranlarda düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 7.11. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

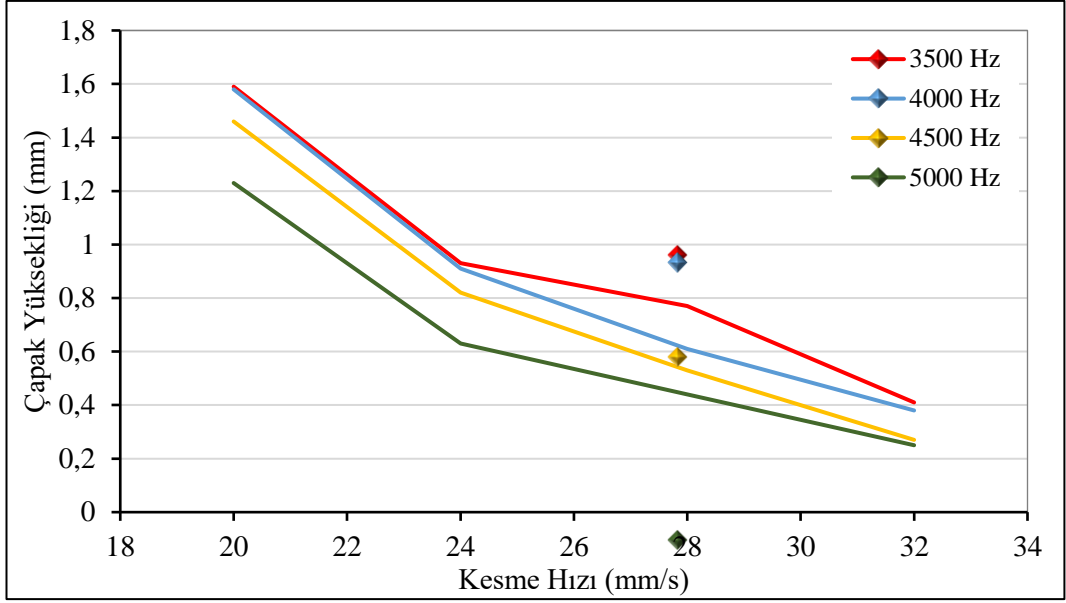
Şekil 7.12’de AISI 310 paslanmaz sac malzemesinde 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılmasının çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,34 mm ile en düşük çapak yüksekliği ölçülmüştür. Kesme hızınının 20 mm/s kadar düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerinde çapak yüksekliği artarak 3,05 mm çıkmıştır. 32 mm/s kesme hızında bütün frekanslarda en düşük çapak yüksekliği görülmektedir. Kesme

hızı ve frekans değerleri arttıkça çapak yüksekliklerinde yüksek oranlarda düşüş olduğu görülmüştür.

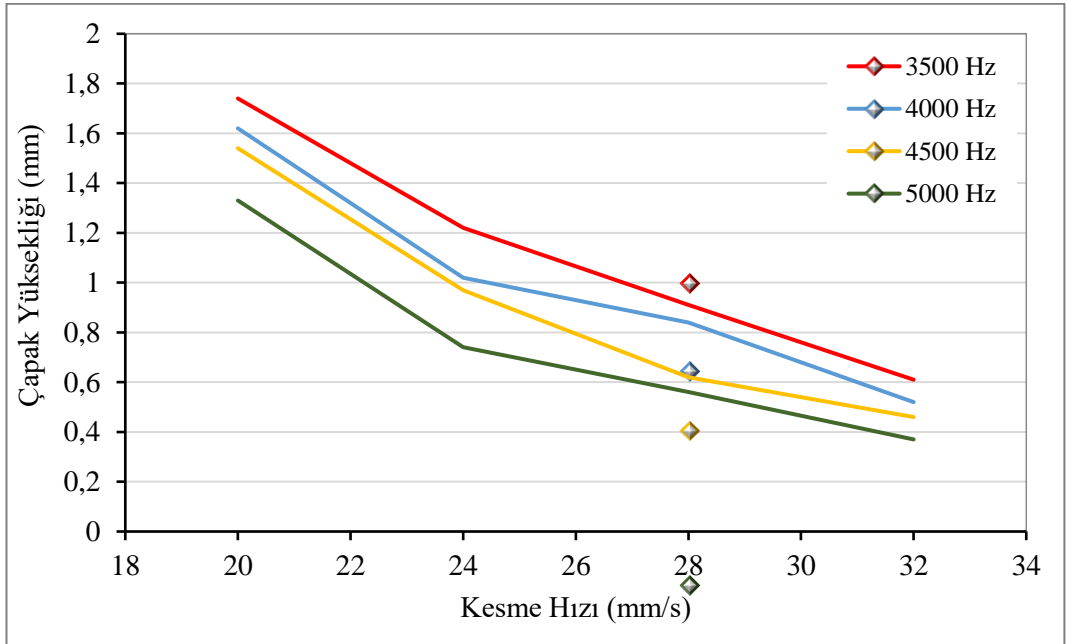


Şekil 7.12. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

Şekil 7.13'te AISI 316 paslanmaz sac malzemesinde 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılması çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,25 mm olurken, kesme hızının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 1,59 mm ölçülmüştür. Ancak 24 mm/s ve 28 mm/s kesme hızlarında, bütün frekans değerlerinde çapak yükseklikleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Kesme hızı ve frekans arttıkça çapak yüksekliklerinde yüksek oranlarda düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 7.13. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

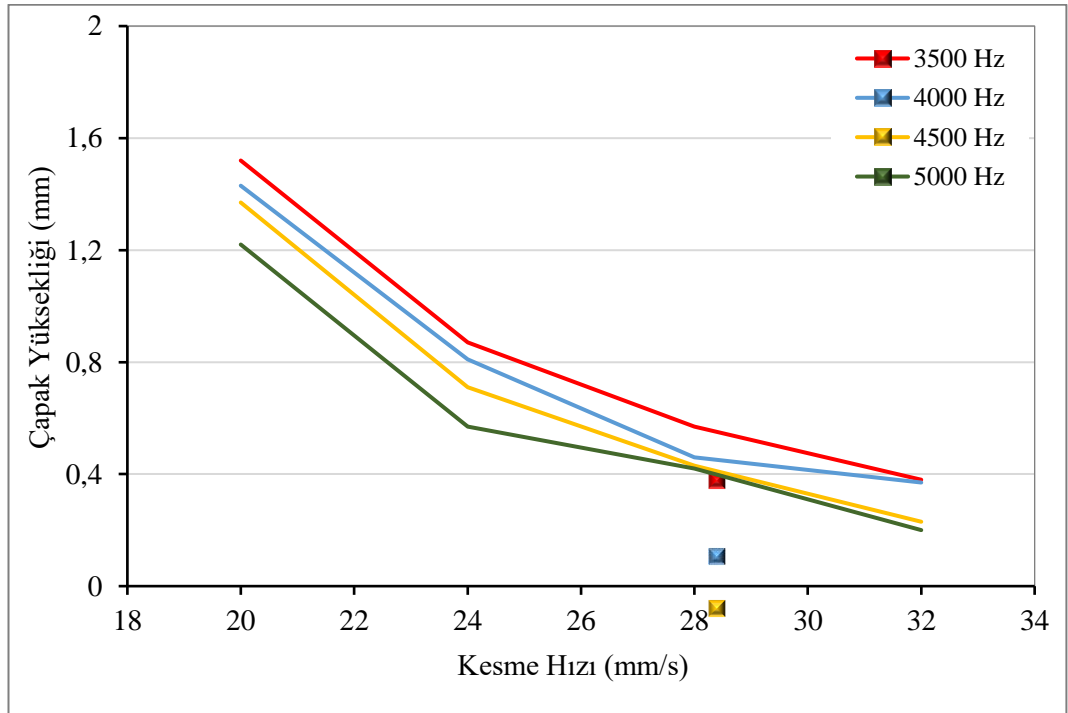


Şekil 7.14. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

Şekil 7.14'te AISI 316 paslanmaz sac malzemesinde 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılmasının çapak oluşum miktarlarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,37 mm olurken, kesme hızınının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans

değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 1,74 mm ölçülmüştür. Ancak 28 mm/s ve 32 mm/s kesme hızlarında, bütün frekans değerlerinde çapak yükseklikleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır.

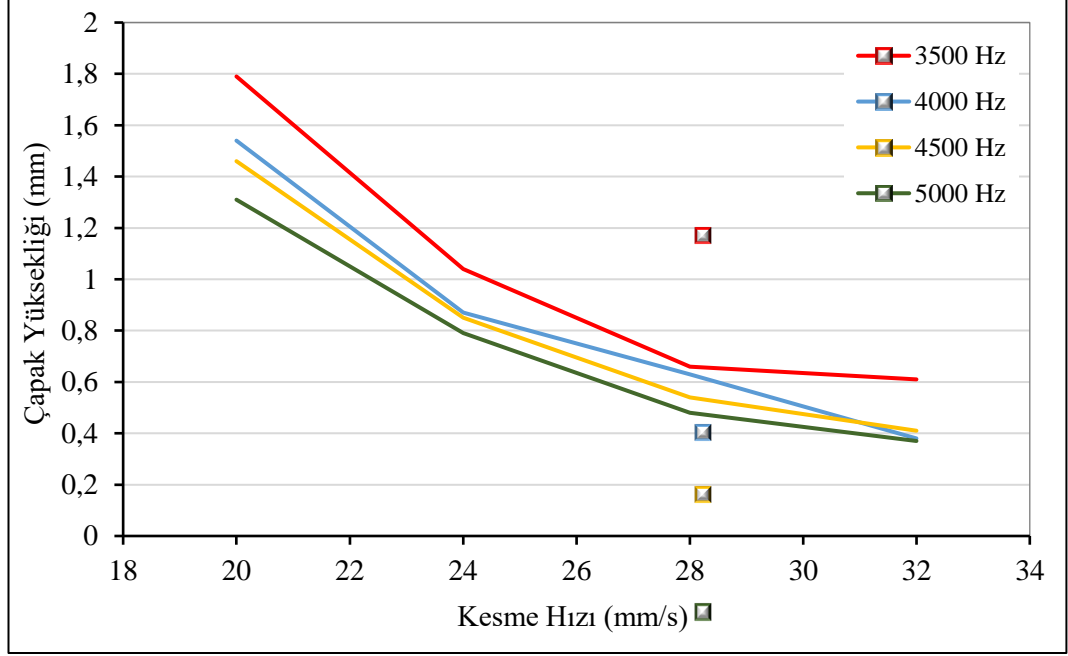
Şekil 7.15'te AISI 430 paslanmaz sac malzemesinde 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hız ve dört farklı frekans değeri kullanılması çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,20 mm olurken, kesme hızının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 1,52 mm ölçülmüştür. Ancak 28 mm/s ve 32 mm/s kesme hızlarında, bütün frekans değerlerinde çapak yükseklikleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır. Kesme hızı ve frekans arttıkça çapak yüksekliklerinde yüksek oranlarda düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 7.15. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

Şekil 7.16'te AISI 430 paslanmaz sac malzemesinde 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekans değeri kullanılması çapak oluşum miktarına etkileri verilmiştir. 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerlerinde en düşük çapak yüksekliği 0,37 mm olurken, kesme hızının 20 mm/s düşürülmesi ile 3500 Hz frekans

değerlerinde en yüksek çapak yüksekliği 1,79 mm ölçülmüştür. Ancak 28 mm/s ve 32 mm/s kesme hızlarında, bütün frekans değerlerinde çapak yükseklikleri birbirlerine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 7.16. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı çapak yüksekliği değişimleri.

Yapılan çalışmada frekans değerinin çapak yüksekliği üzerinde kayda değer bir etkisi olmazken, kesme hızının artması çapak yüksekliğinin artmasına neden olmuştur. Kesme hızının artırılmasının, lazer ışını tarafından çalışma alanına enerji birikimini azalttığı unutulmamalıdır. Çünkü kesme hızının artması ile ışınlama süresi daha az olur. Buda kerf yüzeyindeki ergiyik tabakayı düşürür ve kerf çıkıntısındaki eriyik tabaka kalınlığı yüksek lazer kesim hızlarında daha az olur [65].

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, sabit basınçta kesme hızının artmasıyla birlikte çapak yükseklik değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Diğer taraftan, sabit kesme hızında frekansın artması ile yine çapak yükseklik değerlerinde bir azalma söz konusudur. Bu sonuçlar çerçevesinde AISI 304 için; 1 bar basınç, 5000 Hz frekansı ve 32 mm/s kesme hızı olan işleme parametrelerinde 0,21 mm en küçük çapak yüksekliği ölçülmüştür. AISI 304 için en büyük değer ise 0,8 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 1,75 mm olarak tespit edilmiştir. AISI 310 için

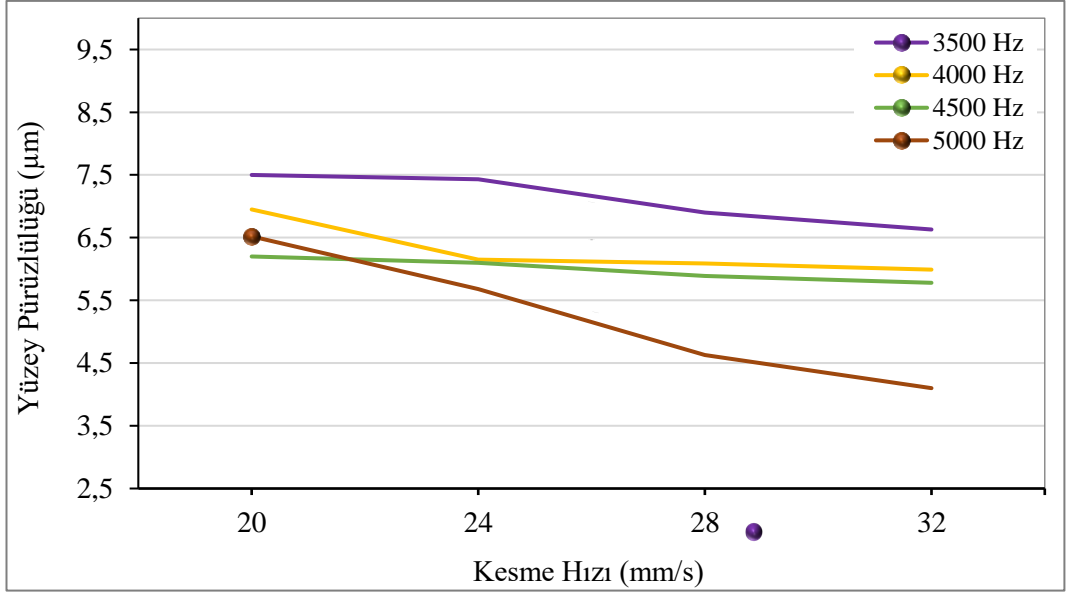
en küçük çapak yüksekliği; basınç değeri 0,8 bar, frekansı 5000 Hz ve kesme hızı 32 mm/s olan parametrelerde 0,19 mm, en büyük değer ise 1 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 3,05 mm olarak ölçülmüştür. AISI 316 için en küçük çapak yüksekliği; 0,8 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 0,25 mm, en büyük değer ise 1 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 1,74 mm olarak ölçülmüştür. AISI 430 için en küçük çapak yüksekliği; 0,8 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 0,20 mm, en büyük değer ise 1 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 1,79 mm olarak ölçülmüştür.

Her bir grafik incelendiğinde en küçük çapak yüksekliği değeri; AISI 310, 0,8 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta 0,19 mm, en büyük ise AISI 310, 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta 3,05 mm olarak bulunmuştur.

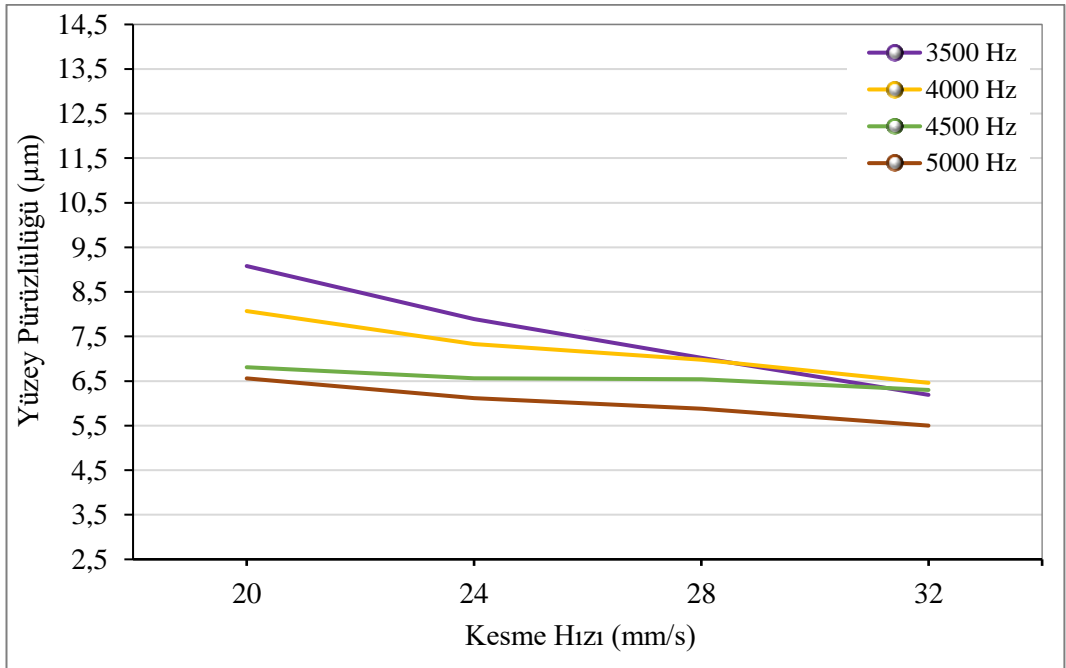
### **7.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ**

İmalat işlemlerinde, nihai ürüne ulaşma noktasında işlenebilirlik kriterleri son derece önemli bir rol oynamaktadır. Bu açıdan, yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden kriterler araştırılması gereken vazgeçilmez bir unsurdur [66]. Bu bağlamda, imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan AISI 304-310-316-430 paslanmaz sac malzemelerin lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir.

Şekil 7.17’de AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 4500 Hz frekansta en düşük yüzey pürüzlülüğü 6,2 µm olmuştur. Kesme hızının sabit kalmasıyla 3500 Hz frekansta 7,5 µm ile en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür. Kesme hızının artırılması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir azalma olmuştur. 0,8 bar basınçta, kesme hızının 32 mm/s ve frekansın 5000 Hz olduğu kesme işleminde 4,1 µm ile en iyi yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.17. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.



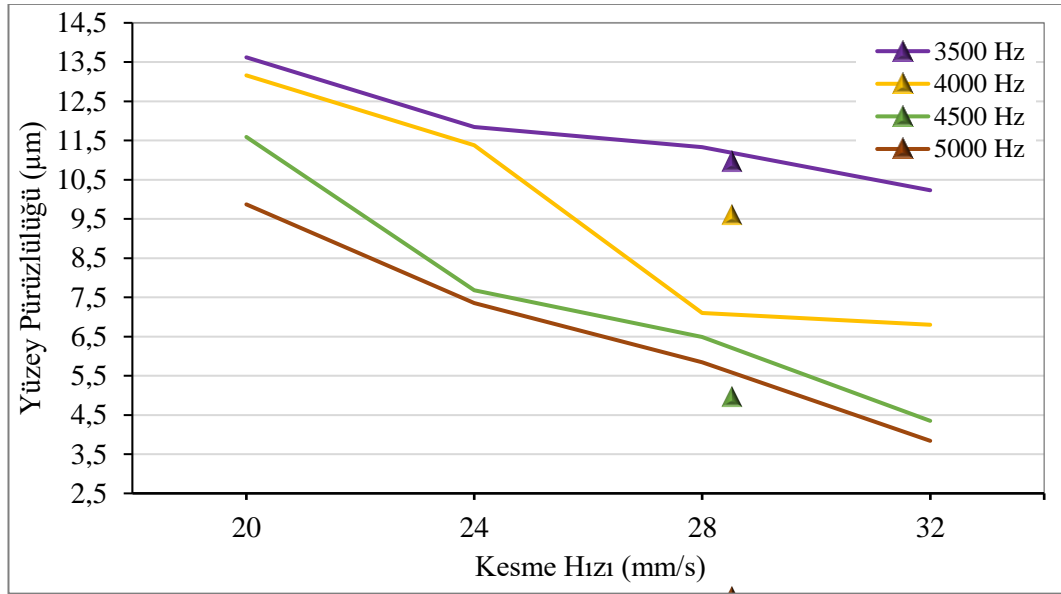
Şekil 7.18. AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 7.18’de AISI 304 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta en düşük yüzey pürüzlülük değeri 9,08 µm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekansın 5000 Hz



çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri %31,83 oranında azalarak 6,19  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının 32 mm/s'ye kadar artması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğü artmıştır. 5000 Hz frekansta 5,5  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür.

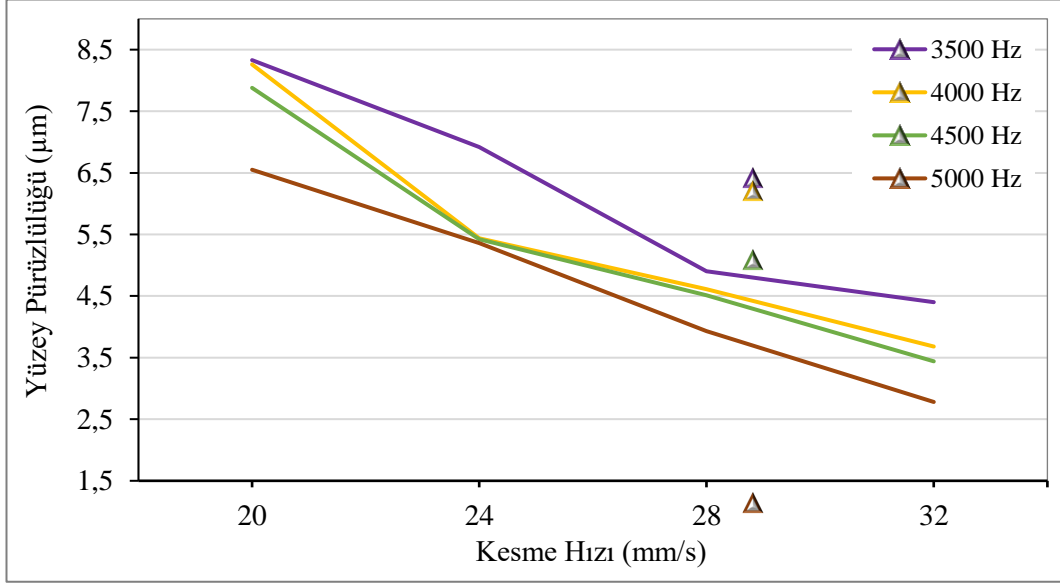
Şekil 7.19'de AISI 310 paslanmaz sac malzemenin 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta en düşük yüzey pürüzlülüğü 9,87  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının sabit kalmasıyla 3500 Hz frekansta 13,62  $\mu\text{m}$  ile en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür. Kesme hızının artırılması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir azalma olmuştur. 0,8 bar basınçta, kesme hızının 32 mm/s ve frekansın 5000 Hz yapılan kesme işleminde 3,84  $\mu\text{m}$  ile en iyi yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır.



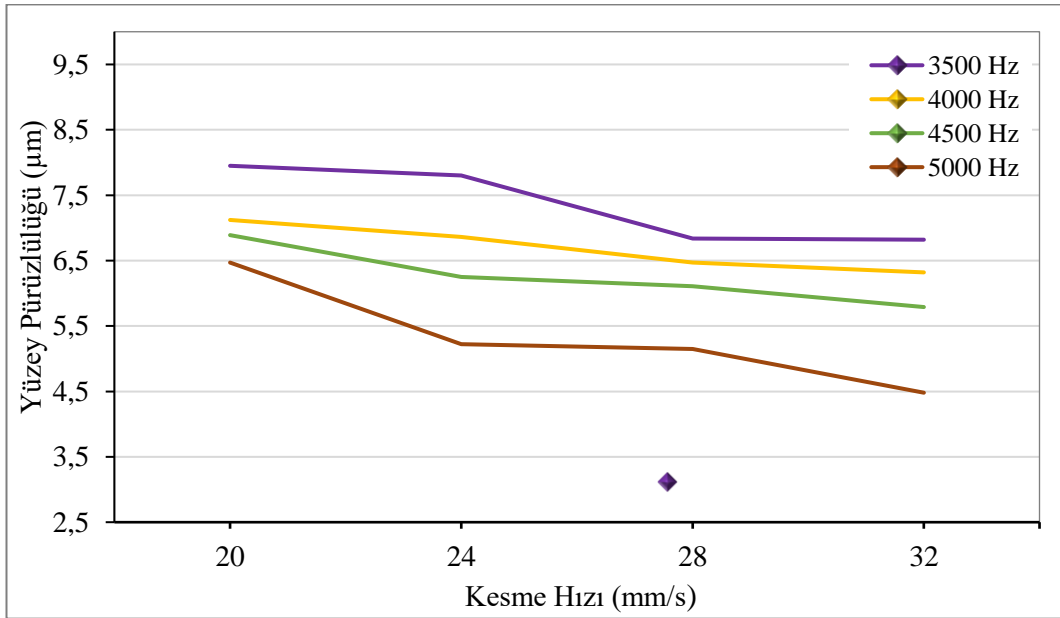
Şekil 7.19. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 7.20'de AISI 310 paslanmaz sac malzemenin 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta yüzey pürüzlülük değeri 8,33  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekansın 5000 Hz çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri %21,36 oranında azalarak 6,55  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının

32 mm/s'ye kadar artması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğü artarak, 5000 Hz frekansta 2,78  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür.



Şekil 7.20. AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

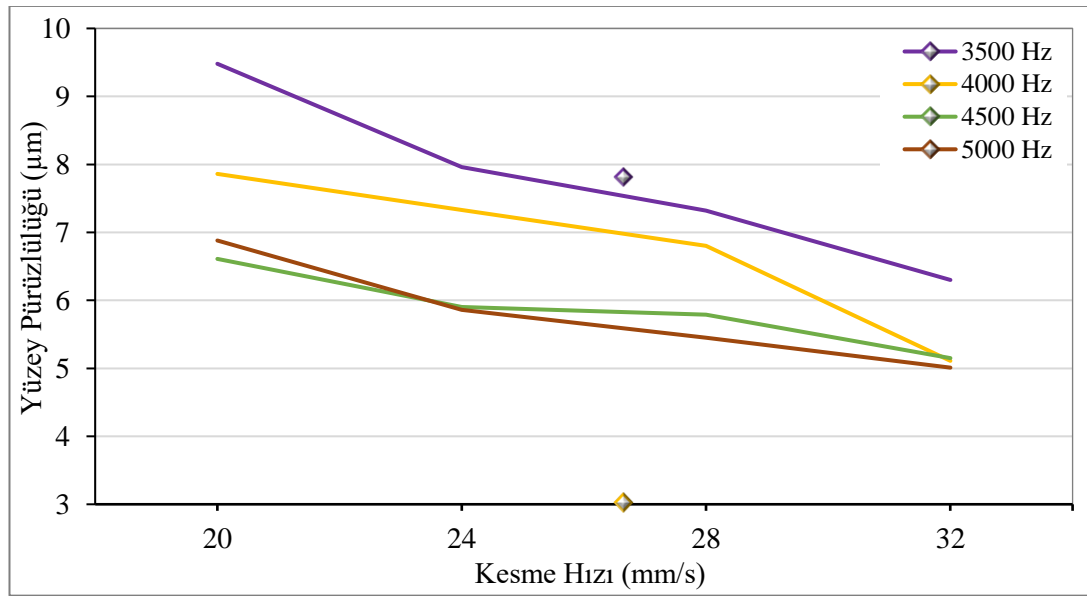


Şekil 7.21. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 7.21'de AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük

sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta en düşük yüzey pürüzlülüğü 6,47  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının sabit kalmasıyla 3500 Hz frekansta 7,95  $\mu\text{m}$  ile en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür. 0,8 bar basınçta, kesme hızının 32 mm/s ve frekansın 5000 Hz olduğu kesme işleminde 4,48  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır.

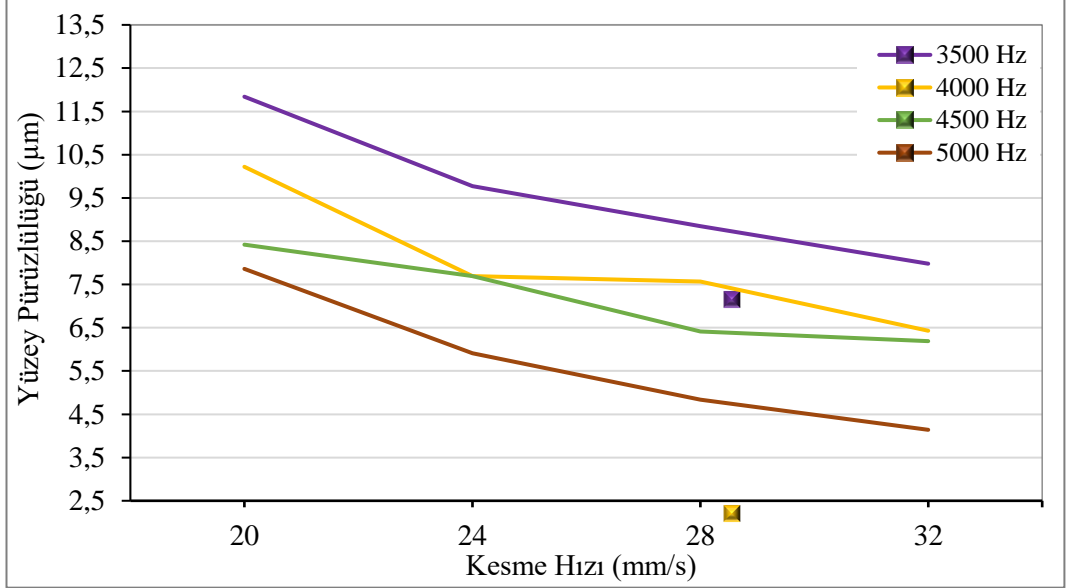
Şekil 7.22’de AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta yüzey pürüzlülük değeri 9,48  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekansın 4500 Hz çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri %30,27 oranında azalarak 6,61  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının 32 mm/s’ye kadar artması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğü artarak, 5000 Hz frekansta 5,01  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür.



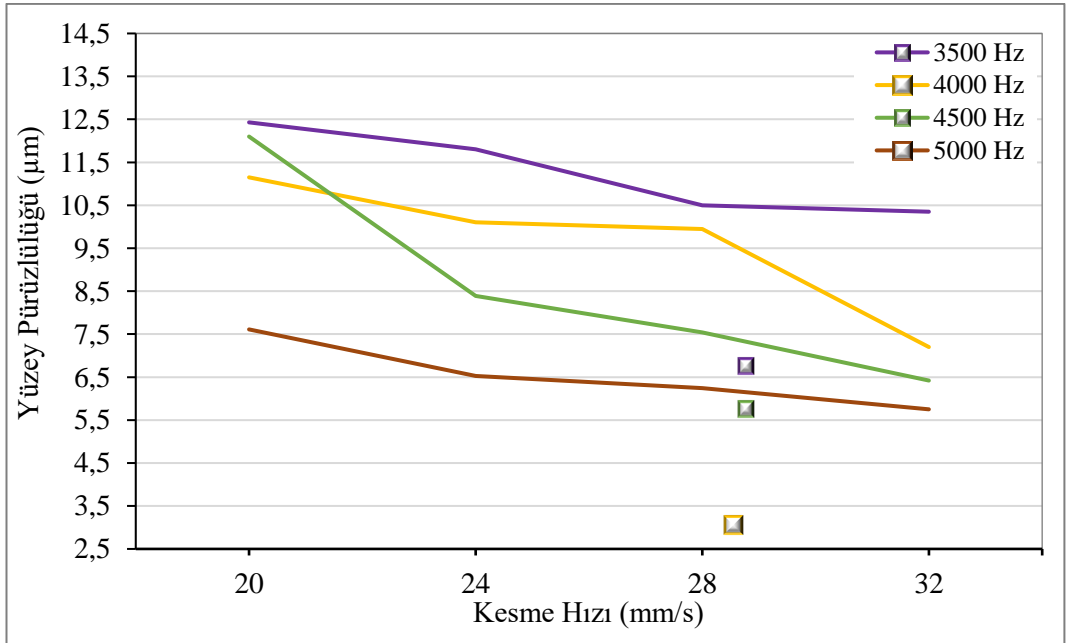
Şekil 7.22. AISI 316 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 7.23’te AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta en düşük yüzey pürüzlülüğü 7,86  $\mu\text{m}$  olmuştur. Kesme hızının sabit kalmasıyla 3500 Hz frekansta 11,84  $\mu\text{m}$  ile en yüksek yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür. Kesme hızının

artırılması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir azalma olmuştur. 0,8 bar basınçta, kesme hızının 32 mm/s ve frekansın 5000 Hz olması ile yapılan kesme işleminde 4,14  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır.



Şekil 7.23. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 0,8 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.



Şekil 7.24. AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta kesme hızı ve frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 7.24'te AISI 430 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, dört farklı kesme hızı ve dört farklı frekansta kesilmesi işlemi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta yüzey pürüzlülük değeri 12,43 µm ölçülmüştür. 20 mm/s kesme hızında frekansın 5000 Hz çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değeri %38,77 oranında azalarak 7,61 µm olmuştur. Kesme hızının 32 mm/s'ye kadar artması ile bütün frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğü artarak, 5000 Hz frekansta 5,75 µm ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüştür.

Her bir grafik incelendiğinde; AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 2,78 µm ile en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri ise AISI 310 paslanmaz sac malzemesinin, 0,8 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 13,62 µm olmuştur.

Yapılan çalışmada basıncın artması ile bütün kesme hızlarında ve frekans değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Lazerle kesme işleminde kesme hızının ve frekans değerlerinin artırılması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmuştur. Bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarla paralellik arz etmektedir. Frekansın artması ile yüzey pürüzlülüğü artarken, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde bir azalma görülmüştür. Özellikle kesme hızının artması ile kesme bölgesindeki eriyik katılaşarak daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü sağlamaktadır. Bu sonuç yapılan bu çalışmada gözlenen daha yüksek kesme hızlarındaki yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen azalma ile tutarlılık göstermektedir [67].

Grafikler genel olarak incelendiğinde, sabit basınç ve frekansta kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Diğer yandan, sabit kesme hızı ve basınçta frekansın artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerinde bir azalma eğilimi tespit edilmiştir.

## BÖLÜM 8

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 8.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AISI 304-310-316-430 paslanmaz sac malzemelerinin lazer ile kesme işlemi sonucu kesme parametrelerinin kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve çapak oluşumu üzerine etkileri değerlendirilerek en uygun kesme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir;

1. AISI 304 paslanmaz sac malzemesi için en düşük kerf genişliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 1,17 mm ölçülürken, en yüksek kerf genişliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 2,81 mm olmuştur.
2. AISI 310 paslanmaz sac malzemesi için en düşük kerf genişliği 0,8 bar basınçta 28 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 0,79 mm ölçülürken, en yüksek kerf genişliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 4,09 mm olmuştur.
3. AISI 316 paslanmaz sac malzemesi için en düşük kerf genişliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 0,45 mm ölçülürken, en yüksek kerf genişliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 3,24 mm olmuştur.
4. AISI 430 paslanmaz sac malzemesi için en düşük kerf genişliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 0,92 mm ölçülürken, en yüksek kerf genişliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 3,41 mm olmuştur.

5. AISI 304 paslanmaz sac malzemesi için en düşük çapak yüksekliği 1 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,21 mm ölçülürken, en yüksek çapak yüksekliği 0,8 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 1,75 mm olmuştur.
6. AISI 310 paslanmaz sac malzemesi için en düşük çapak yüksekliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,19 mm ölçülürken, en yüksek çapak yüksekliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 3,05 mm olmuştur.
7. AISI 316 paslanmaz sac malzemesi için en düşük çapak yüksekliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,25 mm ölçülürken, en yüksek çapak yüksekliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 1,74 mm olmuştur.
8. AISI 430 paslanmaz sac malzemesi için en düşük çapak yüksekliği 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 0,20 mm ölçülürken, en yüksek çapak yüksekliği 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 1,79 mm olmuştur.
9. AISI 304 paslanmaz sac malzemesi için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 4,1 mm ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 9,08 mm olmuştur.
10. AISI 310 paslanmaz sac malzemesi için en düşük yüzey pürüzlülüğü 1 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 2,78 mm ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,8 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 13,62 mm olmuştur.
11. AISI 316 paslanmaz sac malzemesi için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 4,48 mm

ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 9,48 mm olmuştur.

12. AISI 430 paslanmaz sac malzemesi için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,8 bar basınçta 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekans değerinde 4,14 mm ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 1 bar basınçta 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekans değerinde 12,43 mm olmuştur.

13. En küçük kerf genişliği değeri; AISI 316, 0,8 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta 0,45 mm, en yüksek ise AISI 310, 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta 4,09 mm olarak bulunmuştur.

14. Yapılan deneylerde frekans değerlerinin artırılmasının daha büyük kerf genişliğinin oluşmasına neden olduğu ve diğer taraftan kesme hızındaki artışın kerf genişliğinin azalmasına yol açtığı görülmüş, bu da literatürle paralellik arz etmektedir.

15. AISI 304, 310, 316, 430 paslanmaz sac malzemelerin lazer ile kesilmesi incelendiğinde, sabit basınç ve frekansta kesme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir. Diğer yandan, sabit kesme hızı ve basınçta frekansın artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerinde bir azalma eğilimi tespit edilmiştir.

16. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri; AISI 310, 1 bar basınçta, 5000 Hz frekansta ve 32 mm/s kesme hızında 2,78  $\mu\text{m}$ , en büyük yüzey pürüzlülüğü değeri ise AISI 310, 0,8 bar basınçta, 3500 Hz frekansta ve 20 mm/s kesme hızında 13,62  $\mu\text{m}$  olarak ortaya çıkmıştır.

17. Kesme hızının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği tespit edilmiştir. AISI 304, 310, 316, 430 kalite paslanmaz sac malzemeler için en ideal kesme hızının 32 mm/s olduğu tespit edilmiştir.



18. Lazer ile kesme işleminde, sabit basınç ve frekansta kesme hızının artmasıyla birlikte çapak yükseklik değerlerinde bir azalma meydana gelmektedir.
19. En küçük çapak yüksekliği değeri; AISI 310, 0,8 bar basınçta, 32 mm/s kesme hızında ve 5000 Hz frekansta 0,19 mm, en yüksek çapak yüksekliği değeri ise AISI 310, 1 bar basınçta, 20 mm/s kesme hızında ve 3500 Hz frekansta 3,05 mm olarak bulunmuştur.
20. Çapak yüksekliğinde en iyi sonuçlar için en uygun parametreler bir önceki maddedeki ile aynı parametreler olurken, en etkili parametrenin kesme hızı olduğu fakat frekans değerlerinin kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür.

## 8.2. ÖNERİLER

1. Deneylerde kullanılan farklı paslanmaz sac malzemeler farklı kalınlıklarda ve farklı işleme parametreleri kullanılarak işlenebilir ve iş parçasının kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğine etkileri incelenebilir.
2. Paslanmaz sac malzemelerin lazer ile kesilmesinde farklı gazların kullanılması ile kesme sırasında kullanılan gaz türlerinin kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğine etkileri incelenebilir.
3. Deneylerde kullanılan farklı paslanmaz sac malzemeleri ile farklı odak mesafeleri kullanılarak odak mesafesinin kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliğine etkileri incelenebilir.
4. Yapılan çalışmada elde edilen yüzeyler SEM mikroskobu ile incelenerek numunelerin mikroyapı değişimleri incelenebilir.
5. Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından dolayı oluşan ITAB bölgeleri ve sertlik değişimleri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

1. Berkmanns, J. and Faerber. M., “Laser cutting. LASERLINE technical.” *Linde Gas LLC, Germany*, 20 (2008).
2. Gordon, R.G., “The laser, light amplification by stimulated emission of radiation”, *University of Michigan Press*, 1:128-136 (1959).
3. Erdoğan, S., “Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırması”, *Makine Teknik Dergisi*, 19:47-58 (2007).
4. Stournaras, A., Stavropoulos, P., Salonitis, K. and Chryssolouris, G., “An investigation of quality in CO<sub>2</sub> laser cutting of aluminum”, *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Rechnology*, 2, 61-69 (2009).
5. Mert, F., Tunç, M., & Sur, G., “AISI 304 çeliğinin lazer ile kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku, 190-197 (2017).
6. Kurt, M., “Plastik malzemelerin (Ptfe ve Pom) lazer ile kesilme özelliklerinin deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı*, İstanbul, 64-85 (2006).
7. Ertem, R.U., “Paslanmaz çeliklerde lazer kaynak parametre değişimlerinin dikiş geometrisine etkisinin incelenmesi”, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, S:31 583-293 (2013).
8. Zaied, M., Bayraktar, E., Katundi, D., Boujbene, M., Miraoui, I., “Effect of laser cutting parameters on surface quality of low carbon steel (S235)”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 128-134 (2012).
9. Rajaram, J. S., Cheraghi, H. S., “CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 351-358 (2003).
10. Choudhury, I.A. and Shirley, S. “Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation”, *Optics & Laser Technology*, 42, 503-508 (2010).
11. El-Taweel, T. A., Abdel-Maaboud, A. M., Azzam, B. S., and Mohammad, A. E., “Parametric studies on the CO<sub>2</sub> laser cutting of Kevlar-49 composite”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 40, 907-917 (2009).
12. Chen, S.L. and O’Neil, W., “The effects of power rippling on CO<sub>2</sub> laser cutting”, *Optic&Laser Technology*, 125-134 (1997).

13. Golnabi, H., Bahar, M., Razani, M., Abrishami, M. and Asadpour, A., “Design and operation of an ecanescent optical fiber sensor” *Opt. Laser Eng.*, 45, 12-18 (2007).
14. Karol, Y., “Yüksek basınçlı pres döküm ile üretilmiş magnezyum alaşımı malzemelerde lazer kaynağının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Manisa, 15-60 (2010).
15. Kulenovic, M., Begic, D., Cekic, A. and Bliedtner, J., “Laser cutting of tungsten alloy using nitrogen assist gas”, *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium*, Vienna, 21, 54-546 (2010).
16. Önçağ, A. “Çelik jant üretiminde lazer imalat yöntemlerinin kullanımı ve konvansiyonel yöntemlerle karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, İzmir 69-90 (2009).
17. Çelen, S., “Paslanmaz çeliklerin lazer kaynağında kaynak parametrelerinin bağlantının dayanım ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, İzmir 108-153 (2006).
18. Kökey, C., Sezgin, S., Çavuşoğlu, N., Gençalp-İrizalp, S., Saklakoğlu, İ. E. 2016. “İnce paslanmaz çelik sacların fiber lazer ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 57 (674): 65-72 (2019).
19. Tokdemir, M., “Lazer kaynağı le birleştirilmiş demir esaslı t/m malzemelerin kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa (2007).
20. Gördebil, A., “Lazer ile kaynaklanmış P265 Nb çeliklerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı*, Konya, 63-101 (2011).
21. Vatandaş, Ö.G., “Lazer bindirme kaynaklı enine iç perde takviyeli hibrid profillerin dayanım ve ömür analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, İzmir, 62-98 (2010).
22. Durukan, Z., “Lazer ile kesmede iş ve işleme parametrelerinin geometrik ve boyut değişimlerine etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 41-98 (2010).
23. Tanrıverdi, M. A., “Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Bursa, 36-69 (2001).

24. Lamikiz, A., López, L.N. de L., Sánchez, J.A., Pozo, del D., Etayo, J.M., and López, J.M., “CO<sub>2</sub> laser cutting of advanced high strength steels (AHSS)”, *Applied Surface Science*, 242, 362-368 (2005).
25. Kujanpaa, V., Olsen, O. F., Salminen, A., “Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam”, *Lappeenranta University Of Technology Department of Mechanical Engineering*, 33-42 (2006).
26. Karabulut, T.Y., “AA5005 alüminyum alaşımının lazer ve TIG kaynak yöntemi kullanılarak kaynaklanabilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Samsun, 35-67 (2019).
27. Topal, C., “Robotik lazer kaynak ve plazma ark kaynak yöntemleri ile birleştirilen AISI 410S Ferritik paslanmaz çeliğin mekanik, mikroyapı ve kaynak sonrası ısıl işlem özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Tokat, 50-106 (2019).
28. Uzun, R.O., “Lazerle kaynak işleminde kaynak parametrelerinin kaynak kalitesi üzerinde etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 20-34 (2010).
29. Odabaşı, A., “Süper alaşımların karbondioksit lazer kaynak şartlarının optimizasyonu”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 50-100 (2010).
30. Ready, J. F., “Industrial applications of lasers (Second Edition)” *Elsevier*, 247-271 (1997).
31. Hecht, J., “Mc Graw Hill”, *The Laser Guidebook* United States of America 2: 14 (1992).
32. O’Shea, D.C., Callen, W.R. and Rhodes, W.T., 1978. “Introduction to lasers and their applications”, *Addison - Wesley Publishing Company*, Second printing, 2, California, USA.
33. Kuhn, K., “Laser engineering” *Prentice - Hall*, United States of America, 4-5 (1998).
34. Mungan, M. C., “Lazer ile kesme ve endüstri uygulamaları” Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 3-8, 32-37 (2006).
35. Smith, W. V., “Laser applications”, *Artech House Inc*, 1- 3, United States of America (1970).

36. Öner, U., “Lazerle kesme işleminde kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14, 22-43 (2008).
37. Çolpan, M. H., “Lazer gücünün fonksiyonu olarak lazer yüzey işleme üzerine bir çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı*, Konya, 45-51 (2008).
38. Arcan, A., “Lazer ışını ile metallerin kesilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Konstrüksiyon-İmalat Anabilim Dalı*, İzmir, 8-9 (2011).
39. Matoug, K. S. A., “Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (hsla) çeliklerin lazerle kesilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, 9 (2019).
40. Tarakçıoğlu, N., Özcan, M., “Lazerler ve materyal işleme uygulamaları”, *Atlas Yayın Dağıtım*, Ankara, 5-133 (2004).
41. Erdoğan, Ş., “Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 37-38 (2007).
42. Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., Altunpak, Y., “Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri”, *Seçkin Teknik*, 3.Baskı, Ankara, 545 (2013).
43. Ray A. K., “Laser Machining and its thermal effects on silicon nitride and steel”, *Doctor of Philosophy Iowa State University*, 1-21, 121 (1995).
44. Akman, E., “Ti6Al4V Titanyum alaşımlarının atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 3, (2006).
45. Buchfink, G., “The laser as a tool”, *Vogel Buchverlag*, Würzburg (2007).
46. Anık, S., Ögür A. ve Vural, M., “Termik kesme teknolojisi”, *Gedik Eğitim Vakfı Yayını*, 2 No’ lu yayın (1996).
47. Anonymous, “Laser processing”, *Operators Manual*, Bystronic Laser AG, Nidreönz/Switzerland, 2-14 (1996).
48. Pınarcıoğlu, S., “304 Östenitik paslanmaz çelik ile St37 malzemenin gaz ergitme ve lazer yöntemleriyle kesilmesinde işlem parametrelerinin etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 27-28 (2010).
49. Mair, H., “Abgrenzung der thermischen schneidverfahren laserstrahlschneiden, plasmaschneiden und autogenes brennschneiden nach technischen und wirtschaftlichen gesichtspunkten”, *DVS-Verlag*, Dusseldorf, 48-61 (1994).

50. Karaarslan, A., “Lazer ile malzeme işlemleri”, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul (2009).
51. Er, İ., “Karbondiyoksit (CO<sub>2</sub>) lazerle fiber optik yüzeylerinin parlatılması ve verim hesapları”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı*, Ankara, 16-32 (2005).
52. Oral, C., Kumruoğlu, C. L., “Lazer ile kesimin, malzemelere termal etkisi” Orijinal Alıntı, *Alternative Methods for Precision Sheet Metal Fabricating Conference*, June 1996, San Jose, CA by Leonard Migliore (1997).
53. Karaören, K., “Lazer ile kesim parametrelerinin tespiti” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11 (1999).
54. Wandera, C., “Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam”, M.S. thesis, *Lappeenranta University of Technology*, 128 (2006).
55. Radovanovic, M. and Dasic, P., “Research on surface roughness by laser cut”, *The Annals of University*, "Dunarea Dej" of Galati Fascicle VIII, ISSN 1241-4590 Tribology, 84-88 (2006).
56. Ion, J. C., “Laser processing of engineering materials: Principles, procedure and industrial application”, *CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)*, Australia, 576 (2005).
57. Ertek, C., “Plazma ortamında iyon aşıl原因mış 304 ve 316 L paslanmaz çeliklerin korozyon davranışlarının incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-16 (2006).
58. Boardman, B., Deere and Company, Center, T., “Properties and selection: irons steels and high performance alloys”, *ASM Handbook*, 673-688 (2001).
59. Aydın, T., “Paslanmaz çeliklerin MIG kaynağında kullanılan gazlar ve etkileri” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-49 (2002).
60. Taşdemir, V., “AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğine ısı işleminin etkisi” Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ, 6-20 (2006).
61. Euroinox, “Asal çelik paslanmaz-özellikleri”, *The European Stainless Steel Development Association*, İstanbul, Türkiye, 1-31 (2007).
62. İnternet: Gözdem Paslanmaz Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş., “Paslanmaz çelik nedir?”, <http://www.gozdempaslanmaz.com/paslanmaz-celik.asp?ha=1>, (2014).

63. Muhammad, N., Whitehead, D., Boor, A., & Li, L., "Comparison of dry and wet fibre laser profile cutting of thin 316l stainless steel tubes for medical Device Applications" **Journal of Materials Processing Technology**, 210, 2261-2267 (2010).
64. Bahçe, E., Kılıçkap, E., Özel, C., "Al-5005'in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması", **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir, 242-250 (2010).
65. Keles, O., & Oner, U., "A Study of the laser cutting process: Influence of laser power and cutting speed on cut quality". **Lasers in Engineering**, 20, 319-327 (2010).
66. Akkurt, M., "Makina Elemanları Cilt II", **Birsen Yayınevi**, İstanbul, Türkiye, (2000).
67. Neimeyer, R., Smith, R.N., & Kaminski, D.A. "Effects of operating parameters on surface quality for laser cutting of mild steel", **Journal of Engineering for Industry**, 115, 359-362 (1993).

## **ÖZGEÇMİŞ**

İbrahim CEBECİ, 1993 yılında Sakarya’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Sakarya’da tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2018 yılında mezun oldu. Halen özel bir firmada Üretim Yöneticisi olarak çalışmaktadır. 2018 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu Yüksek Lisans Programına devam etmektedir.

### **İLETİŞİM BİLGİLERİ**

**Adres** : Kabakoz Mah. 818. Sok. No:8 Kat:2

Karasu/SAKARYA

**E-posta** : İbrahim.cebeci.54@hotmail.com