

**CO<sub>2</sub> LAZER KESİM TEZGÂHLARINDA KESME  
PARAMETRELERİNİN YÜZEY  
PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**2015  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Murat TUNÇ**

**CO<sub>2</sub> LAZER KESİM TEZGÂHLARINDA KESME PARAMETRELERİNİN  
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Murat TUNÇ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Haziran 2015**

Murat TUNÇ tarafından hazırlanan “CO<sub>2</sub> LAZER KESİM TEZGÂHLARINDA KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR  
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 16/ 06/ 2015

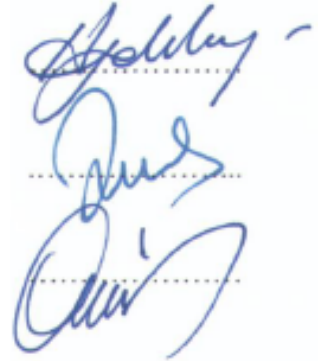
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN (GÜ)



09/ 07/ 2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ  
Fen Bilimleri 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.”*

Murat TUNÇ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **CO<sub>2</sub> LAZER KESİM TEZGÂHLARINDA KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**Murat TUNÇ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR**

**Haziran 2015, 76 Sayfa**

Bu çalışmada CO<sub>2</sub> lazer tezgâhlarında kullanılan kesme parametrelerinin AISI 304 kalite paslanmaz çelik sacların kesim işlemi sonrası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney tasarımında kullanılan 3 mm AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac belirlenen geometrik bir modelde kesilerek hazırlanmıştır. İşleme deneylerinde literatürde yapılan çalışmalar sonrası önem arz eden parametreler ve ön deneylerde belirlenen parametreler sabit ve değişken olarak iki gruba ayrılmıştır. Sabit parametre olarak (Frekans, Duty, Nozzle, Malzeme, Focus ve Mercek), değişken olarak ise (Güç, Hız, Basınç, Yardımcı gaz) parametreleri alınmıştır. Kesilen parçaların sabitlenmesi için özel bir fikstürü yapılarak lazer kesim yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerleri profilometre yardımı ile ölçülmüş tablo ve grafiklere dönüştürülerek yorumlanmıştır. Yapılan bu çalışma Telmek A.Ş. bünyesinde hali

hazırda kullanılan parametrelerle karşılaştırılarak zaman, işçilik, enerji sarfiyatı hesaplamaları yapılarak deneylerde elde edilen sonuçlar ile kesim yapıldığında firmanın maliyet giderlerinin düşeceği önerilmiştir. Üretim sektöründe çalışan birçok firmaya ışık tutması açısından bu çalışma önemli bir yere sahiptir.

**Anahtar Sözcükler :** CO<sub>2</sub> Lazerle Kesme, Kesme Parametreleri, Kesme Hızı, Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri.

**Bilim Kodu** : 914.3.028

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **ANALYSE ON EFFECTS OF CUTTING PARAMETERS USED IN CO<sub>2</sub> LASER MACHINES ON SURFACE ROUGHNESS**

**Murat TUNÇ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Gökhan SUR**

**June 2015, 76 Pages**

The effects of cutting parameters which are used in CO<sub>2</sub> laser machines on surface roughness of AISI 304 quality stainless steel after cutting process is examined in this study. AISI 304 quality stainless steel is prepared with the help of a determined geometrical model by cutting. In processing experiments, parameters are divided into two sections as constants and variables. Frequency, Duty, Nozzle, Material, Focus and Lens parameters are kept as constant, Power, Speed, Pressure and Substitute Gas parameters are kept as variable. With the help of a special fixture to fix the parts which are cut, surface roughness values, which are measured by Profilometer, presented and interpreted by transforming the surface roughness's values into table and graphics. The results of this study is compared with the existing parameters which are used in Telmek A.Ş and it is observed that time, labour and energy can be saved by using the right parameters. This study has an important position to light

the way for the companies which take place in production sector.

**Key Words** : CO<sub>2</sub> Laser Cutting, Cutting Parameters, Impact of cutting parameters on surface roughness.

**Science Code** : 914.3.028



## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. LİTERATÜR TARAMASI GENEL DEĞERLENDİRME ÖZETİ .....	14
BÖLÜM 3. ....	15
LAZERİN TARİHÇESİ TANIMI VE ÇEŞİTLERİ .....	15
3.1. LAZERİN TEMEL PRENSİPLERİ.....	16
3.2. DALGA BOYU DİYAGRAMINDA LAZERİN YERİ .....	18
3.3. LAZER ÇEŞİTLERİ .....	19
3.3.1. Optik Pompalamalı Katı Lazerler.....	19
3.3.2. Sıvı Lazerler.....	19
3.3.3. Boyar Maddeli Lazerler .....	20
3.3.4. Dinamik Gaz Lazerleri .....	20
3.3.5. Kimyasal Lazerler.....	20
3.3.6. Yarı İletken Lazerler.....	21

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.3.7. Lazerlerin Yükselteç Ve Osilatör Olarak Kullanılması.....	21
3.3.8. Kısa, Güçlü Darbeler Üreten Lazerler .....	22
3.3.9. Ayarlanabilir Lazerler.....	22
3.3.10. Katı Lazerleri.....	23
3.3.11. Gaz Lazerleri .....	23
3.3.12. Serbest Elektronlu Lazerler .....	24
3.4. MOD.....	24
3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	25
3.6. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ.....	25
3.7. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENE BİLİRLİĞİ.....	26
3.7.1. Endüstriyel Çelikler .....	26
3.7.2. Paslanmaz Çelik.....	27
3.7.3. Alüminyum .....	29
3.7.4. Titanyum.....	29
3.7.5. Bakır Ve Pirinç .....	29
3.7.6. Sentetik Malzemeler .....	29
3.7.7. Organik Malzemeler .....	29
3.8. LAZER UYGULAMA ALANLARI .....	29
BÖLÜM 4. ....	31
LAZERLERDE KULLANILAN KESME GAZLARI.....	31
4.1. OKSİJEN.....	31
4.2. AZOT VE ARGON.....	31
4.3. BASINÇLI KESME GAZI .....	32
4.4. KESME GAZI TÜRÜ VE KALİTESİ.....	32
4.5. BASINÇ .....	32
BÖLÜM 5. ....	33
LAZERLE KESME İŞLEMİ.....	33
5.1. CO <sub>2</sub> LAZER TEZGÂHINDA LAZER OLUŞUMU VE İLETİMİ .....	33
5.2. LAZERLE KESME İŞLEMİ .....	34
5.2.1. Kesme Yöntemi .....	34

	<u>Sayfa</u>
5.2.2. CO <sub>2</sub> Lazer Tezgâhının Avantajları Ve Dezavantajları .....	35
5.3. LAZER IŞINI İLE KESMEDE İŞ GÜVENLİĞİ .....	36
BÖLÜM 6. ....	37
PASLANMAZ ÇELİK .....	37
6.1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	41
6.2. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	42
6.3. MARTENSİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER .....	43
6.4. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER.....	44
6.5. ÇÖKELMEYLE SERTLEŞTİRİLMİŞ PASLANMAZ ÇELİKLER (PH) ..	45
6.6. PASLANMAZ ÇELİĞİN TARİHİ .....	45
BÖLÜM 7. ....	46
MATERYAL VE METOD .....	46
7.1. DENEY NUMUNESİ .....	46
7.2. LAZER TEZGÂHI.....	48
7.3. CO <sub>2</sub> LAZER KESİM İŞLEMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELERİ .....	49
7.4. KESME DENEY ŞABLONU VE KESME GEOMETRİSİ.....	51
7.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜM CİHAZI (PH) .....	53
BÖLÜM 8. ....	55
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR .....	55
8.1. GÜÇ VE FOCUS DEĞERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK DENEY SONUÇLARI.....	55
8.1.1. Hava Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Mesafesi Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları.....	55
8.1.2 Azot Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Mesafesi Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları.....	57
8.1.3 Oksijen Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Mesafesi Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları.....	58
8.2. KESME GAZINA BAĞLI OLARAK İLERLEME HIZI VE GAZ BASINCININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ .....	61

BÖLÜM 9. ....	69
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	69
KAYNAKLAR .....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1.	Şekil 3.1.Lazer güç halkaları .....	17
Şekil 3.2.	Q anahtarlı yakut (Cr+3 Ruby) lazer.....	18
Şekil 3.3.	Dalga boyları ve lazerin yeri .....	18
Şekil 3.4.	Yarı iletken lazer görünümü, Yarı iletken lazer oluşumu .....	21
Şekil 3.5.	Lazer türlerinin K katsayısının karşılaştırılması .....	25
Şekil 3.6.	Lazer ile kesme işleminde kullanılan alaşımlı çelik uygulamaları .....	27
Şekil 3.7.	Lazerde kullanılan soğutucu gaz uygulamaları a) Azot ile kesim, b) Hava ile kesim, c) Oksijen ile kesim. ....	28
Şekil 3.8.	Lazer uygulamaları a) Açılı kesim, b) Düz kesim, c) Oval kesim. ....	30
Şekil 5.1.	Lazer ışınının tezgâh üzerinde izlemiş olduğu yol.....	34
Şekil 6.1.	Krom Oranın Korozyona Etkisi .....	37
Şekil 6.2.	Östenitik Yapı .....	41
Şekil 6.3.	% 12 Krom içeren ferritik bir mikro yapı görülmektedir. Küçük karbür parçacıkları da mevcuttur. Malzeme tavllanmış bir malzemedir (x500)..	42
Şekil 6.4.	% 18 krom ve % 0,03 karbon içeren bir ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı görülmektedir 1150 °C ‘den hızlı soğutulmuştur (x500). ....	43
Şekil 6.5.	Martensitik Yapı Şekil .....	44
Şekil 6.6.	Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları .....	45
Şekil 7.1.	AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac. ....	47
Şekil 7.2.	“Mazak Space Gear”, 2500 W, CO2 CNC lazer kesim makinası.....	48
Şekil 7.3.	Focus (odak noktası) görseli. ....	49
Şekil 7.4.	Lazer ışın gücü etkisi.....	49
Şekil 7.5.	CO <sub>2</sub> Lazer frekans görseli .....	50
Şekil 7.6.	Nozzle.....	51
Şekil 7.7.	Lazer merceği/lensi. ....	51
Şekil 7.8.	Deney kesme geometrisi .....	53

Şekil 7.9. TR200 surface roughness tester kalibrasyonu.....	54
Şekil 7.10. Yapılan ölçümün grafiksel gösterimi .....	54
Şekil 8.1. Hava gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.....	57
Şekil 8.2. Azot gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.....	58
Şekil 8.3. Oksijen gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.....	60
Şekil 8.4. Şekil 8.4. 1700 W kesme gücünde focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.....	61
Şekil 8.5. Hava gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	62
Şekil 8.6. Oksijen gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	63
Şekil 8.7. Azot gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	64
Şekil 8.8. Karşılaştırmaya yönelik optimum kesme parametreleri ve işletmenin kullandığı parametrelerle gerçekleştirilen deneye ait parça görüntüsü ...	66

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 3.1. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması .....	25
Çizelge 7.1. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim çizelgesi .....	47
Çizelge 7.2. “Mazak Space Gear”, CO <sub>2</sub> CNC lazer kesim makinası teknik özellikleri .....	48
Çizelge 7.3. CO <sub>2</sub> lazer kesim tezgahında gerçekleştirilen kesme deneylerinde, kullanılan sabit ve değişken parametreler .....	52
Çizelge 7.4. Güç ve Focus değişkenlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik deney şablonu.....	52
Çizelge 7.5. Yardımcı gaz, basınç ve ilerleme hızı değişkenlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik deney şablonu .....	53
Çizelge 8.1. Çizelge 8.1. Hava gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları. ....	56
Çizelge 8.2. Azot gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları .....	58
Çizelge 8.3. Oksijen gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları .....	59
Çizelge 8.4.Hava gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları .....	62
Çizelge 8.5.Oksijen gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları .....	63
Çizelge 8.6. Azot gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları .....	62
Çizelge 8.7. Yapılan karşılaştırma deneylerine ait parametreler .....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

- $V_c$  : Kesme hızı (m/dak)  
 $F_n$  : İlerleme miktarı (mm/dev)  
 $a_p$  : Kesme derinliği (mm)  
 $r_e$  : Kesici takım yarıçapı (mm)  
 $F_r$  : Radyal kuvvet (N)  
 $F_f$  : İlerleme kuvveti (N)  
 $F_c$  : Esas kesme kuvveti (N)  
 $R_a$  : Ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )

### KISALTMALAR

- ASTM : Amerikan Malzeme ve Test Derneği (American Society for Testing and Materials)  
CVD : Kimyasal Buhar Çökertme (Chemical Vapor Deposition)  
PVD : Fiziksel Buhar Çökertme (Physical Vapor Deposition)  
YMK : Yüzey Merkezli Kübik  
HMK : Hacim Merkezli Kübik  
ISO : Uluslararası Standartlar Teşkilatı (International for Standardization)  
CNC : Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Lazer teknolojisi son yıllarda önemli gelişmeler göstermiş olup, birçok önemli sektörde karşımıza çıkmaktadır. Lazer teknolojisi başlıca; askeri alanlarda, elektronik ve bilgisayar sektöründe, havacılık sektöründe, tıp biliminde, imalat endüstrisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1-10]. Mühendislik açısından incelendiğinde lazer ışınımı kaynak, kesme ve delme işlemlerinde önemli bir uygulama alanına sahiptir. Lazer ile kesme yönteminde enerji kaynağı olarak lazer ışınımı kullanılır. Bu yöntemle kesme işlemi lazer ışınımının, kesilecek olan metal yüzeyinin kesim bölgesine yoğunlaşması şeklinde gerçekleşir. En yaygın kullanılan lazer türü karbondioksit lazeridir. Bu kesme yöntemini ince ve kalın saçlarda uygulamak mümkün olup, kalıp maliyetleri ortadan kaldırılmış, minimum fire oranı ile maliyetler aşağı çekilmiştir [11-27].

Lazer ışını, karbondioksit lazer tezgâhların da, karbondioksit gazına elektrik akımı verilerek oluşturulur. Bunun yanı sıra verimi daha da arttırmak için karbondioksit gazına azot ve helyum gazı eklenerek verim artırılır. Elde edilen lazer ışını ile çeşitli tezgâhlar da yapılan kesim işlemine ise lazer kesim denilmektedir. Lazer ışınının bu şekilde elde edilmesinin kolaylaşması ile de uygulama alanlarında artışlar görülmüştür. Lazer kesim ile üretim yapılmasında ki en büyük sebep, üretim hatasını minimum düzeye indirmek ve otomasyonu sağlayabilmektir. Mühendislikte ve sanayide rahatça kullanılabilmesi lazer kesime olan ilgiyi oldukça arttırmıştır [30].

Lazerin çeşitli tezgâhlar da uygulanmasıyla üretim 24 saat yapılabilir ve seri üretim sağlanmasıyla maliyette azalmaktadır. Lazer kesim ile yapılan kesme işlemlerinden aparat ve kalıptan tasarruf sağlanır. İş yükü makinelere bindiği için insan faktöründen kaynaklanan hatalarda dolaylı olarak azalmış olur.

Ahşap, nikel alaşımları, çelik, krom, titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları vb. malzemelerin kesme işlemleri yapılabilir. CAD programının kullanımının sağladığı avantajlar ile kesimler daha kısa sürede yapılmakta ve parçalar aynı anda takımlar halinde kesilebilir [25].

Teknolojide çığır açan bu yöntem sektörün önde gelen tüm alanlarında çeşitli şekillerde kullanılmaktadır. Başlıca kullanım alanları askeri projeler, elektronik ve bilgisayar sektöründe, havacılık sektöründe, tıp biliminde, imalat endüstrisidir. İmalat endüstrisi ve mühendislik açısından incelendiğinde lazer teknolojisi ile kaynak, kesme ve delme işlemlerinde önemli bir uygulama alanına sahiptir, çevre dostu olan lazer kesme teknolojisi ABD’de ve Avrupa ülkelerinde son yıllarda ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır [26].

Literatür taraması sonucu araştırmacılar tarafından sözü edilen ortak görüşün lazer tezgâhının birçok parametresinin olduğu ve bu parametrelerin hepsinin araştırılmaya muhtaç konular olduğu tespit edilmiştir. Parametrelerin etkisinin araştırılmasına yönelik çok fazla çalışma olmadığı tarama sonucunda tespit edilen bir başka noktadır.

Bu çalışmanın yapılmasındaki amaç bünyesinde çalışmakta olduğum Telmek AŞ’de ve piyasada yaygın olarak kesimi yapılan malzeme olan AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac kesimleri esnasında zaman, işçilik ve kesim esnasında oluşan ölçü hatalarının giderilmesi ve kesme yüzey kalitesinin artırılmasıdır. CO<sub>2</sub> lazer tezgâhında deneyler uygulanırken, sabit parametre olarak Frekans, Duty, Nozzle, Malzeme ve Mercek seçilmiştir değişken parametre olarak ise Focus Güç, Hız, Basınç, Yardımcı gaz parametreleri alınmış ve bunların yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılarak kesilen yüzeylerin pürüzlülük değerleri tablo ve grafiklere dönüştürülerek sunulmuş ve yorumlanmıştır.

Deneyley, Mazak Space Gear 2,5 kW CO<sub>2</sub> lazer tezgâhında gerçekleştirilmiştir, kesme işleminden sonra TR200 Surfece Roughness Testere ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler ışığında sabit ve değişken parametrelerin yüzeý pürüzlülüğüne etkileri ve en ideal kesme parametreleri belirlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lazerin temeli 1916 yılında Albert Einstein tarafından önerilen uyarılmış ışınım teorisi ilkesine dayanmaktadır. Einstein'ın bu teorisine göre uyarılmış ışınım enerji seviyesindeki bir atom düşük enerji seviyesine indiğinde foton yayması gerekir bunun sonucu olarak enerji meydana gelir. Albert Einstein tarafından ortaya atılan bu teoriye dayanarak 1950'li yıllarda Columbia Üniversitesin'den Charles H. Townes tarafından amonyak kullanılarak mikrodalgaların yükseltilmesi prensibine dayanan MAZER bulunmuştur. Mazer'in bulunmasından sonra bilim adamları bunun optik bölgelere uygulanabilirliği üzerinde çalışmalara başlamışlar ve bunun sonucu olarak lazerle ilgili çalışmaların temelini atmışlardır. İlk olarak 1958 yılında C. Townes ve A. L. Schowlow tarafından lazerin elde edilmesi için gerekli süreç ve fiziksel koşullar öne sürülmüştür. Bunun sonucunda lazer teknolojisi oldukça hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Theodore H. Maiman tarafından, 16 Mayıs 1960 yılında yakutla çalışan ilk lazer bulunmuştur. Aynı yılın Kasım ayında P. P. Sorokin ve M. J. Stevenson ilk uranyum lazerini geliştirmiş olup, yine 1960 yılının 12 Aralığında Ali Javan, William R Bennett ve Donald Herriot, Bell Laboratuvarlarında helyum-neon lazerini bulmuşlardır. 1963 yılında C. Kumar ve N. Patel tarafından karbondioksit lazeri bulunmuştur. 1964 Yılına girildiğinde Joseph Geusic, H. M. Marcos ve Le Grand Van Uiltert tarafından Nd: YAG lazeri bulunmuş olup, aynı yıl William Bridges tarafından argon iyon lazeri bulunmuştur [24].

Hızla gelişen lazer teknolojileri sonucunda, günümüze kadar birçok lazer çeşidi geliştirilmiş. Literatürde yapılan çalışmalarda birçok bilim insanının gelişen bu teknoloji alanında çalışması olduğu gözlemlenmiştir.

Kaluç, yaptığı çalışmada CO<sub>2</sub> lazer ile kesimin diğer kesme teknolojileriyle karşılaştırmasını yapmış ve kesme aralığı, ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) diğer yöntemler göre daha iyi sonuç verdiğini saptamıştır [1].

Ray, seramik ve metallerin lazerle etkileşimini incelediği çalışmada ilerleme hızının, gücün ve yardımcı gazın parçanın boyutsal değişimine, kesme aralığına, yüzey pürüzlülüğüne ve termal etkilere sebep verdiğini saptamıştır [4].

Yılbaş, paslanmaz çelik levhaları CO<sub>2</sub> lazer ile işleyerek yaptığı deneylerde parametre olarak kesme hızı, yardımcı gaz basıncı, levha kalınlığı ve lazer puls frekansı olarak kesme kalitesinde ölçülebilir değişkenleri gözlemlemiştir. Elde edilen sonuçlar seçilen her parametrenin lazer kesimine etkisinin belirgin olduğunu göstermiştir. Kesme hızı ve yardımcı gaz basıncının, kesme kalitesine etkisinin en belirgin olduğunu bu durumda kesme hızı ve yardımcı gaz basıncı tek başlarına genel kesme kalitesini etkilediğini belirlemiştir. Parametrelerin, kesme hızı yardımcı gaz basıncı, malzeme kalınlığı yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansı kalınlık gibi birinci derece etkileşimlerinin dalgalanma, düzlemsellik ve genel kesme kalitesi üzerinde belirgin etkisi olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak yardımcı gaz basıncının, kesme kalitesini lazer puls frekansı, levha kalınlığı ve kesme hızı ile birlikte etkilediğini belirlemiştir. İkinci derece etkileşimleri incelediğinde sadece kesme hızı yardımcı gaz basıncı - lazer puls frekansının dalgalanma ve genel kesme kalitesinde etkisini görmüştür. Bu çalışmayla Yılbaş, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansının lazer ile kesmede en önemli parametreler olduğunu belirlemiş, ek olarak malzeme kalınlığının da kesme kalitesini etkilediğini, birinci derece etkileşimlerinin sonuçlarından ortaya çıkarmıştır [10].

Nagaraja, lazer kesme esnasında oluşan maliyetlerin sebeplerini araştırdığı çalışmasında lazer parametrelerinden olan yardımcı gaz, güç, malzeme kalınlığının ve diğer etmenlerin doğru tayin edilmesinin işletmeleri gerçek zamanlı üretim için, kayıpların azaltılmasında önemli bir yeri olduğunu hesaplamalarla ortaya koymuştur [13].

Rajaram, ve arkadaşları, CO<sub>2</sub> lazer ile kesme işleminde kesik kalitesini inceledikleri çalışmalarında öncelikle 4130 çelik numunelerini kesmiş, lazer gücü ve kesme hızının kesme aralığı, yüzey pürüzlülüğü, oyuk sıklığı ve ısı tesiri altında kalan bölge büyüklüğüne etkilerini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler ile birlikte lazer gücünün kesme aralığında önemli bir etkisi olduğu halde kesme hızının daha az etkisi olduğunu gözlemişlerdir. Lazer gücünü azaltıp, kesme hızı artırıldığında genelde kesme aralığının ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) azaldığını görmüşlerdir. Düşük güç düzeylerinde, kesme hızını arttırmak kesme aralığının ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) çok az seviyelere düşmesine sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yüksek güç seviyelerinde ise kesme hızının artması kesme aralığında daha büyük azalmalara neden olurken, ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) küçük artmalara neden olmuştur. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne ve oyuk oluşumunda önemli etkisi olduğunu görmüş, hız artırıldığında yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığını belirlemişlerdir [15].

Ghany ve Newishy, 1,2 mm östenitik paslanmaz çelik kullanılarak yapıları çalışmada kesme hızının, gücün, focusun, frekansın kesme üzerindeki etkilerini araştırarak çapaksız kesme için parametreler belirlemişlerdir [19].

Kujanpää ve arkadaşlarının, yaptıkları çalışmalarda 2 mm'den kalın paslanmaz çeliklerin, fiber lazer ve CO<sub>2</sub> lazer tezgâhlarında kesimlerinin karşılaştırılması yaparak kesim kalitesi kesme aralığı, kesme yüzünün dikliğini ve yüzey pürüzlerini etkilerini araştırmışlardır. CO<sub>2</sub> lazerlerin 4 mm'ye kadar olan kalınlıklarda ideal bir seçim olacağına, 4 mm üzeri kesimlerde ise fiber lazer teknolojinin daha iyi sonuçlar vereceğini saptamışlardır. Her iki teknolojiye de kesme parametrelerinin uygun seçilmesinin, özellikle kesme hızının lazer ışın kalitesinin ve kesme kalitesinin üzerinde etkili olduğunu belirlemişlerdir [26].

Mungan, çalışmasında lazer ile kesme yöntemleri ve avantajlarından bahsedilip, lazer kesme tezgâhlarının genel özelliklerinden, kesim parametrelerinden güç, yardımcı gaz, mercekle ve malzemeyi değişken olarak belirleyerek hangi toleranslara kadar kesiminin yapılabileceği tespit etmiştir [27].

Çelen, çalışmasında lazer kaynağı mekanizması ve darbeli lazer dikiş kaynağının parametrik analizi araştırılmıştır. Darbeli lazer dikiş kaynağı ortalama tepe güç yoğunluğu (APPD), lazer gücü, kaynak hızı ve darbe süresi parametrelerinin özellikle birleştirme dayanımı ve kaynak kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, bir darbeli Nd:YAG lazer ışın kaynağıyla paslanmaz çeliklerin alın dikişi şeklinde kaynak edilebilirliği konusu araştırılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde tam nüfuziyet, minimum ITAB ve kabul edilebilir kaynak profili elde edebilmek için, kaynak hızları, darbe süreleri ve koruyucu gaz kombinasyonlarının uygun bir şekilde seçilmesi gerektiğini belirlemiştir [28].

Akman, titanyum alaşımlarının atımlı Nd:YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi çalışmasında alaşımların atımlı lazer dikiş kaynağı parametrelerini belirlemek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Atım enerjisi ve atım süresi arasındaki oran kaynak derinliğini belirlemekteki en önemli faktör olduğunu bu nedenle ilk olarak atım enerjisi ve atım süresi belirleyerek, istenilen kaynak kalitesini elde etmek için atım şekli lazer atım frekansı, kaynak hızına göre belirlemiştir. Kullanılan atımlı Nd:YAG lazerine ait kaynak parametrelerinin kaynak işlemine olan etkileri yapılan testler sayesinde belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre atım enerjisinin atım süresine oranına eşit olan lazer tepe gücünün, kaynak derinliğini belirlemede en önemli parametre olduğu belirlenmiştir. Tepe gücü belli bir değerin üzerine çıktığında anlık aktarılan enerjisinin fazlalığından dolayı malzeme yüzeyinde kraterler oluştuğu gözlenmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için, sabit tepe gücünde lazer atım süresi arttırılarak kaynak derinliğini arttırma yoluna gidilmiştir. 2800 µm kaynak derinliğine yüzeyde oluşan 153 µm derinlikli krater ile ulaşılabilmektedir. Lazer frekansı, lazer kaynak hızına göre belirlenmiş, yüksek hızlarda çalışılmak istenildiğinde lazer frekansının arttırılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Kayna işlemlerinde kaynak bölgesinin, çevredeki gazlarla reaksiyona girip, malzemenin oksitlenmesine neden olması nedeniyle, koruyucu gazın bu noktada çok önemli olduğu ortaya çıkmıştır. Gazlarla ilgili olarak dikkat edilmesi gereken diğer bir noktanın, gazın kaynak bölgesinde türbülansa neden olmasını engellemek olduğu sonucuna varılmıştır. Aksi takdirde gazdan elde edilebilecek verimin düşeceği ve oksitlenme meydana geleceği görülmüştür [29].

Erdoğan, lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması çalışmasında, işleme parametreleri olarak; 1,2–4 mm iş parçası kalınlığı, 2500–4000 kW lazer gücü, (-4)-(-2) inç odaklama mesafesi, 8–14 bar yardımcı gaz basıncı, 500–1200 Hz lazer frekansı seçilmiştir. Delme işleminden sonra optik mikroskopta elde edilen görüntülerden çap ölçümü, ısı tesiri altındaki bölge ve yeniden katılaştıran bölge büyüklüğü ölçümü yapılarak işleme parametrelerinin delik kalitesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1,2 mm için alt ve üst yüzeylerde daireye en yakın olarak 2500 kW, 0 inç, 10 bar, 500 Hz deliğinde çap değeri 0,98 mm olarak elde edilmiştir. 2 mm için alt ve üst yüzeylerde daireye en yakın olarak 2500 W, -4 inç, 8 bar 800 Hz deliğinde çap değeri 0,66 mm olarak elde edilmiştir. 2,5 mm için alt ve üst yüzeylerde daireye en yakın olarak 3000 W, -4 inç, 8 bar, 1200 Hz deliğinde çap değeri 0,58 mm olarak elde edilmiştir. 4 mm için alt ve üst yüzeylerde daireye en yakın olarak 3000 kW, -4 inç, 12 bar, 1000 Hz deliğinde çap değeri 0,86 mm olarak elde edilmiştir. 1,2 mm için 2500 kW -2 inç, 8 bar, 1200 Hz'in 1 numaralı deliğinde minimum 0,03 mm yeniden katılaştıran bölge ve 0,18 mm ısı tesiri altındaki bölge meydana gelmiştir. 2500 kW -2 inç, 8 bar, 1200 Hz deliğini oluşturan parametreler 2 mm kalınlık için delik giriş açısı ve koniklik değerleri açısından en düzgün deliği oluşturan parametreler olduğunu belirlemiştir [30].

Öner, lazer ile kesmede uygun parametrenin seçimi kesme kalitesi açısından çok önemli olduğunu ve AISI 304 paslanmaz çeliğin CO<sub>2</sub> ile kesiminde. Farklı parametreler kullanılarak kesme hızı, lazer gücü, lazer puls frekansı ve malzeme kalınlığının kesme aralığı ve yüzey kalitesine etkisi incelenmiş. Sonuç olarak farklı parametrelerde yapılan lazer kesimleri sonucu yüksek güç ve yüksek hızlarda daha düzgün yüzeyler elde etmiştir. Kesme hızının (ilerleme) artmasıyla, kesme aralığının azaldığı görülmüş ve kesilen malzemedeki kalınlık artışı kesme aralığını arttırdığı gözlemlenmiştir [32].

Kamaruzaman, çalışmasında CO<sub>2</sub> lazer tezgâhı ile kesimi yapılan akrilik malzeme üzerinde araştırma yapmıştır. Gücün, kesme aralığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından büyük önem arz ettiğini farklı güç seviyelerinde yaptığı deneylerle tespit etmiştir [33].



Kasman, lazer mikro işleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin deney tasarım yöntemiyle belirlenmesi çalışmasında oyma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi değerlendirilmiştir. Optimal oyma parametreleri, en düşük yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında fiber lazer kullanılarak EN 5754 alüminyum alaşımının yüzeyi işlenmiş ve bu işleme için işlem parametreleri olarak ışın tarama hızı ve güç seçilmiştir. Deneyler sonucunda işlem görmüş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar deney tasarımı yöntemlerinden biri olan Taguchi metodu kullanılarak sistem parametrelerinin ve seviyelerinin etkileri incelenmiştir. Ortalama S/N oranlarının sayısal ve grafiksel gösterimi yardımıyla en yüksek S/N oranına bakılarak en iyi yüzey pürüzlülük değeri, tarama hızının ikinci seviyesi olan 150mm/s' de ve gücün birinci seviyesi olan 10 kW 'da elde edilmiştir. Analiz sonucu bulunan S/N oranına göre, en iyi proses çalışma şartlarında hız için 150mm/s değeri bulursa da, 150mm/s ile 250mm/s arasındaki bir hız değerinin en iyi çalışma hızını vereceği düşünülmektedir. Her iki parametrenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkinlik yüzdeleri varyans analizi yardımıyla tespit edilmiştir. Buna göre; tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi % 11,56 ve gücün etkisi ise % 42,62 olarak hesaplanmıştır [34].

Kasman, diğer bir çalışmasında ise EN7075 alüminyum alaşımı için lazer işlem parametrelerinin etkilerini Taguchi metodu kullanarak incelemiştir. EN7075 alüminyum alaşımının fiber lazer tezgâhı kullanılarak oyulması işleminde işlem parametrelerinden etkin gücün, tarama hızının, frekansın ve tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü derinliğine olan etkilerini araştırmıştır. Tarama hızının hem Ra hem de derinlik için en yüksek ve anlamlı etkiye sahip olduğunu bununla birlikte frekansın, hem Ra hem de derinlik üzerinde ihmal edilebilecek kadar küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Tarama aralığının derinlik üzerinde ihmal edilebilecek ikinci anlamlı etkiye sahip parametre olduğu fakat Ra üzerinde aynı etkinliğe sahip olmadığı tespit edilmiştir. Optimum koşullara göre doğrulama test deneyleri yapılmıştır ve sonuçlar göstermiştir ki, hesaplanan tahmini değerlerle ölçülen değerlerin sonuçları neredeyse aynıdır. Bu nedenle, Taguchi metodunun Ra ve derinlik için en uygun koşulların belirlenmesinde kullanılabileceği saptamıştır [36].

Kasman, yaptığı diğer bir çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik ve EN 5754 alüminyum alaşımı malzemelerin fiber lazer ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün tespiti için istatistiksel olarak araştırmıştır. AISI 304 paslanmaz çeliği ve EN 5754 alüminyum alaşımından hazırlanmış is parçalarının yüzeylerinin 20 kW fiber lazer kullanılarak işlenmesinde, işlem parametrelerinden tarama yonun, tarama hızının, frekansın, tarama aralığının ve gücün, yüzey pürüzlülüğü (Ra) üzerindeki etkilerini araştırmaktır. İşlem parametrelerinin etkileri Taguchi L18 ortogonal deney düzeni kullanılarak araştırılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) ve sinyal - gürültü (S/N) (en küçük en iyi) oranlarının sonuçları kullanılarak parametrelerin istatistiksel olarak Ra üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, her iki malzeme için tarama hızının ve gücün Ra üzerinde en yüksek ve istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğunu bununla birlikte, diğer parametrelerin Ra üzerinde değişim meydana getirecek kadar büyük bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. AISI 304 paslanmaz çelik için parametrelerin belirlenen seviyelerine göre oluşturulan deney kombinasyonundan hesaplanan yüzey pürüzlülük değeri 1,969  $\mu\text{m}$  iken aynı kombinasyona göre gerçekleştirilen lazer yüzey işleme sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülük değeri 1,94  $\mu\text{m}$ 'dir. EN 5754 alüminyum alaşımı için de farklı bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Buna göre hesaplanan ve ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 6,795  $\mu\text{m}$  ve 6,01  $\mu\text{m}$  olduğunu tespit etmiştir [39].

Patel ve Patel, Hardox-400 Malzemelerin lazer tezgâhında kesiminde lazer gücünü, gaz basıncını, meme çapını ve kesme hızı etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, kesme aralığının güç, kesme hızı, gaz basıncı ve frekansa bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Deneyleerde ilk olarak lazer gücünü 1000 W, gaz basıncını 0,6 bar, ilerleme hızı olarak 200 mm / dak ve frekans olarak ise 25 Hz. seçmiş ve azalan kesme hızında minimum kesim aralığı genişliğinin olduğunu belirlemişlerdir. Diğer deneylelerinde ise yüksek lazer gücü olarak 2000 W, gaz basıncı 0,7 bar, kesme hızını 600 mm/dak ve frekansı 20 Hz. olarak aldıklarında ise kesme aralığının maksimum olduğunu belirlemişleridir [38].

Akkurt ve arkadaşları, AA2024 alüminyum alaşımlarının lazer kaynağında kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini araştırmış ve alüminyum malzemelerin birleştirilmesinde yoğun olarak kullanılmaya başlanan lazer kaynak yönteminde,

lazer kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirilmiş AA 2024 alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. AA 2024 seçilmesinin sebebi makine imalat sanayi, havacılık ve uzay çalışmalarında alüminyum malzemelerin yoğun bir şekilde kullanılmasıdır. Işın Güç Yoğunluğu ( W/mm<sup>2</sup>), Lazer Gücü ( W) ve Darbe Enerjisi (Joule) parametreleri değişken olarak seçilmiştir. Bu amaçla, deney numuneleri üç farklı gruba ayrılmış ve her grupta farklı bir parametre karşılaştırılmıştır. Kaynak parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla, mikro yapı incelemesi, mikro sertlik ölçümü ve çekme testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, en iyi mekanik özelliklerin I. Grup numunelerde elde edildiğini göstermiştir. Lazer gücünün artması ile ısıdan etkilenen bölgenin genişlediği bunda mekanik özellikleri olumsuz etkilediği belirlenmişlerdir [40].

Madiç ve Radovanoviç, paslanmaz çelik CO<sub>2</sub> lazer kesim işleminde parametrelerin ısıdan etkilenen bölge analizini yapmışlardır. ısıdan etkilenen bölge için Taguchi yöntemini kullanarak güç, kesme hızı, yardımcı gaz basıncının, focusun etkileri saptamışlardır. Analizlerde kesme hızı, güç, focus ve yardımcı gaz basıncını ısıdan etkilenen bölgede maksimum etkisi olduğunu ortaya koyulmuştur. Son olarak, Monte Carlo yöntemi kullanılarak ısıdan etkilenen bölgeyi minimize etmek için optimum lazer kesim parametre değerleri tespit edilmişlerdir [41].

Başka bir çalışmaların Madiç, Radovanoviç, CO<sub>2</sub> lazer kesim işleminde ısıdan etkilenen bölgenin ve çapak oluşumunun azaltılması için koşulların belirlenmesi çalışmasında Taguchi yöntemini kullanarak AISI 304 kalite paslanmaz çeliklerin kesim işleminde kullanılan kesme hızı, güç, yardımcı gaz ve focus parametrelerinin kesmeye etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak yardımcı gaz basıncının etkisinin ihmal edilebilir olduğunu, focusun konumunun ısıdan etkilenen bölge ve çapak yüksekliğini etkileyen önemli bir parametre olduğunu çalışmalarında belirlemişlerdir [44].

Madiç, Radovanoviç, yaptıkları diğer bir çalışmada ise 3 mm AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeyi kesme işlemini Taguchi metodu ile modellemiş ve

kesme hızı, lazer güç ve focusun yüzey pürüzlülüğü etkileyen ana parametreler olduğu sonucuna varmışlardır [46].

Kulenovic ve arkadaşları, CO<sub>2</sub> lazerler kullanılarak alaşımli çeliklerin için işlem parametreleri optimizasyonunu yaptıkları çalışmalarında, parametrelerin optimum değerinin maksimum tasarruf, kalite ve verimlilik için gerekli olduğunu ifade etmektedirler. Kesme esnasında oksijen ve azot yardımcı gaz olarak kullanılmıştır. Bu iki gaz için karşılaştırılma yapıldığında azotun alaşımli çeliklerin kesiminde en ideal gaz olduğunu belirlemişlerdir [42].

Petersen, Jensen, yaptıkları çalışmalarında lazer tezgâhlarında yüksek kalitede delik işleme şartlarını araştırmışlardır. Çalışma yapılırken malzeme alüminyum EN AW-1050A (% 99,5 Al), sac kalınlı olarak: 0,5 – 0,7 – 1–2 mm, kesim hızı: 60-70 mm / s, odak noktası: 3.0mm, lazer güç: 420 W, gaz basıncı: 20 bar olarak belirlemişlerdir. Deneyslerini bu belirtilen parametreler üzerinden gerçekleştiren araştırmacılar malzeme kalınlığının kaliteli bir işlemede önemli bir yere olduğunu saptamışlardır [47].

Zaied, ve arkadaşları, lazer kesim parametrelerinin düşük karbonlu çelik malzemenin işlenmesindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında yüzey pürüzlülük değerlerini ANOVA yöntemi ile matematiksel olarak modellemişlerdir. Çalışmaların 8 mm kalınlığında malzemeyi değişken kesme hızları uygulayarak (600, 1200 ve 2200 m /dak ) ve uygulanan gücü değişken olarak almış (3, 4 ve 5 W) ve sonuç alaşımli çelik (S235) malzemenin kesiminde hızın yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkinin önemli olduğu sonucuna varmışlardır [44].

Çavdar, Tanrısever, lazer ışını kullanarak imalat konularında literatürde mevcut yayınların geniş bir değerlendirilmesi yapılarak lazerle malzeme kesim alanındaki olası gelişmeler tartışılmışlardır. Literatürde mevcut yayınlarda bahsedilen konuları beş ana başlık altında toplamışlardır: Deneysel çalışmalar, derleme çalışmaları, kesme parametrelerinin optimizasyonu çalışmaları, lazerle kesmeye yönelik teorik modelleme çalışmaları ve lazerle kesme ile ilgili diğer akademik çalışmalardır. Yapılan çalışma sonucunda Lazer ışını yardımıyla malzemelerin işlenmesi konusu

günümüzün imalat sektörünün güncel ve gelecek işlemleri açısından çok önemlidir. Lazerle kesme ve şekillendirme işlemleri, tezgâhların daha da gelişimi ile daha çok uygulama alanı bulacaktır. Tezgâhların en uygun parametreler ile çalıştırılması verimlilikleri açısından çok önemlidir. Lazerle kesim konusundaki literatürü tarama amacı taşıyan bu çalışmada konu ile ilgili yeni çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalarda genel kesme parametreleri ortak olmakla birlikte farklı malzemeler için uygulamalarla karşılaşılmıştır. Bir malzeme için uygun olan kesme parametresi diğer bir malzemede farklı sonuçlara götürebilmektedir. Bu nedenle malzemeye bağlı çalışmalar açık noktalar da göz önüne alınarak çeşitlendirilmelidir. Örneğin alüminyum ve magnezyum alaşımları ile birlikte performans çelikleri alanında optimizasyon çalışmalarına ihtiyaç vardır. Bunun dışında metal olmayan malzemeler; kompozit plakalar, çeşitli polimerler ve ağaç temelli malzemeler konusunda çalışmalar yapılmalıdır. Bu tür malzemelerin otomotiv ve mobilya sektörlerindeki önemi açıktır ve kullanımları giderek artacaktır. Optimum kesme parametrelerin elde edilmesinde minimum deney sayısı da önemli bir araç olduğundan deney tasarımı konusu da ön planda tutulmalıdır. Bu nedenle yayında geçen optimizasyon çalışmaları ve değişik tasarım yöntemleri alanında da gelecekte çalışmalar yapılabilir. Taguchi yaklaşımı ve kurulan özel algoritmalar ile yapay sinir ağları yöntemi ön plana çıkacağı sonucuna varmışlardır [48].

Çırak ve Durukan, çalışmalarında CO<sub>2</sub> lazer ile 4, 6 ve 8 mm kalınlığındaki Ç1040 malzemesi kesilmişlerdir. Kesme parametreleri olarak lazer gücü ( W), kesme ilerlemesi (F) ve gaz basıncı (P) kullanılmıştır. Kesme işleminde 100 x 100 mm boyutundaki kare ve 40 mm çapında delik delinmiş olup; dış kenar ve çap değerlerindeki sapmalar ölçülmüştür. Kalınlığı 4 mm olan malzemede en iyi kesim ve istenilen geometrik boyutunun elde edilmesi için uygun parametreler, lazer gücü 3000 W ile kesme ilerlemesi 3100 mm/dak ve gaz basıncı 0,5 bar olarak tespit edilmiştir. 6 mm kalınlığındaki malzemede aynı koşullarda kesilen numunelerin en iyi kesim ve istenilen geometrik boyutu için uygun parametreler, lazer gücü 3000 W, kesme ilerlemesi 2900 mm/dak , gaz basıncı 0,55 bar olarak ortaya çıkmış. 8 mm kalınlığındaki malzemedan kesilen geometriler için en uygun parametreler, lazer gücü 3000 W, kesme ilerlemesi 2650 mm/dak ve gaz basıncı 0,60 bar olarak belirlemişlerdir. 8 mm'lik numunelerde gaz basıncı kesilen bölgede boyut değişimi

yerine kesme sırasında cürufun dışarı atılmasında etkili olduğu görülmüştür. 8 mm kalınlığındaki malzemeden kesilen daire geometrisinde, farklı olarak kesme ilerlemesi 2650 mm/dak ve gaz basıncı 0,60 bar olarak belirlenmiş. Daire geometrisinin lazer kesimi sırasında, lazerin duraklaması gereken herhangi bir köşe olmadığından dolayı ve malzeme kalınlığının artmasına bağlı olarak daha yavaş bir kesme ilerlemesinde daha iyi kesme sonuçları ortaya çıkarmıştır. Bu durum 6 ve 8 mm kalınlıklarda daha net olarak görülmüşlerdir. Dış kenar ve çap ölçme sonuçlarının boyutsal doğruluğu üzerine güç ve kesme ilerlemesi parametrelerinin etkili parametreler olduğu saptanmıştır. Boyutsal doğruluğun sağlanmasında, malzeme kalınlığı da göz önünde bulundurularak, kesim sırasında düşük lazer gücü kullanarak istenilen ölçüye en yakın ölçünün elde edildiği görülmüş, lazerle kesme işleminde ilerleme hızı arttıkça, yüzeyde meydana gelen çizikler ve buna bağlı olarak, yüzey pürüzlülüğü değerleri de artmakta, yani yüzey kalitesi azalmakta olduğu sonucuna varmışlardır. Bu modellemelerinde ayrıca nozul çapı, nozul ile yüzey arası boşluk ve CO<sub>2</sub> gazı debisine ait değerler değiştirilerek, bunlara karşılık gelen CO<sub>2</sub> gazı ve malzeme kalınlıkları da, yine çok iyi sonuçlar verecek şekilde tahminlerde bulunmuşlardır. [51].

Durukan ve arkadaşları, 4 ve 6 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzeme üzerinden belirli ölçülerde üçgen, kare ve dairesel şekilli parçalar farklı kesme şartlarında CO<sub>2</sub> lazer kesim tezgâhı ile kesilmiş ve kesilen numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde kesme parametrelerinin etkileri araştırmışlardır. Bağımsız değişkenler olarak lazer gücü ( W ), kesme ilerlemesi ( F ), odak noktası ( ON ) ve gaz basıncı ( P ) seçilmiştir. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Tekniği ( TFT ) kullanılarak bağımsız parametrelerin üç farklı seviyesinde 4 ve 6 mm kalınlığındaki sac malzemeler üzerinde toplam 486 deney yapılmıştır. 3 boyutlu koordinat ölçme tezgâhı ( CMM ) ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen deneysel veriler kullanılarak üçgen, kare ve dairesel şekilli numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde lazer kesme parametrelerinin etkilerini içeren ikinci dereceden tahminsel modeller Regresyon Analizi ile geliştirilmiştir. % 95 güven seviyesinde geliştirilen tahminsel denklemlerin korelasyon katsayıları  $R^2 = 0,78$ 'in üzerinde elde edilmiştir. Bu çalışmada denilmesi gereken başka bir husus ise, bağımsız parametrelerin boyutsal doğruluk üzerinde etkilerini gösteren ana etki grafikleri oluşturulmuş ve

parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Kesilen parçaların boyutsal doğruluğu üzerinde en etkili parametreler sırasıyla lazer gücü, kesme ilerlemesi ve odak noktası olduğu sonucuna varmışlardır [50].

## **2.1. LİTERATÜR TARAMASI GENEL DEğERLENDİRME ÖZETİ**

CO<sub>2</sub> lazer tezgahlarında kesme parametrelerinin yüzey przllğine etkileri üzerine yapılan araştırmaların % 90' nında parametrelerin etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin endüstride en yaygın kullanım alanına sahip olan CO<sub>2</sub> tezgahlarında kesme şartlarını iyileştirdiği kanaatine varılmıştır. Kalıp gereksinimi olmadan hızlı protitip üretimi, anında tasarımı yapılan ürünün üretilmesi gibi özellikleri sebebiyle de kullanımlarının giderek artmış ve artacağı düşünülmektedir. CO<sub>2</sub> lazer tezgahlarında kesme parametrelerinin yüzey przllğine etkileri üzerine yapılan araştırmalarda kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme miktarı focus, ve yardımcı gaz) kesme üzerine etkileri, ortalama ve yüzey pürüzlülüğü, bakımından incelenmektedir.

CO<sub>2</sub> lazer tezgahlarında kesme parametrelerinin yüzey przllğine etkileri üzerine yapılan çalışmalarda parametrelerin incelenmesi ve birbirleri üzerine etkilerini kıyaslayan çalışma sayısının yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan alışmalar genellikle lazerin genel yapısı, ilerleme hızı ve g parametreleri üzerinde yoğunlaştırılıp, focus mesafesi, yardımcı gaz, etkilerini dikkate alan çalışama sayısının da eksik olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada paslanmaz AISI 304 kalite paslanmaz malzemede en iyi kesme şartlarının azot gazında, güç 1700 W, 0mm focus, 9 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme oluştuğu karşılaştırmalı olarak tespit edilmiştir. Seçilen kesme koşullarının kesme üzerine etkileri grafiklerle anlatılmıştır.

## BÖLÜM 3

### LAZERİN TARİHÇESİ TANIMI VE ÇEŞİTLERİ

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimesi ” uyarılmış ışınım yayımıyla ışığın yükseltilmesi”, şeklinde ifade edilmektedir. Lazer tek bir dalga boyuna sahip yapışık ve yüksek bir ışıktır, atomik enerjiyi elektro manyetik enerjiye dönüştürür.

Bilim ve Mühendislik tarihinde lazerin gelişimi heyecan verici bir bölümdür. Alışılmamış çeşitlilikteki alanlarda kullanılan cihazların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Lazer tarihine 1917, Albert Einstein ile başlanabilir. Einstein teorik olarak uyarılmış ışınım kavramını geliştirmiştir. Uyarılmış ışınım kavramı lazerde kullanılan bir fenomendir. Uyarılmış ışınım ışığın yükseltilmesini sağlayıp, yüksek yoğunluktaki lazer ışığının elde edilmesini sağlar. Uyarılmış ışınım prosesinin esas doğası Einstein tarafından teorik olarak açıklanmıştır [32].

İkinci Dünya Savaşı sırasında bilim dünyasının ilgisi ışık tayfının, mikrodalga kısmına yoğunlaşmıştır. 1954’de Maser (microwave amplification by stimulated emission of radiation) Charles Townes ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. 1950’lerde masere ilgi artmış ve geliştirme çabaları masere yönelmiştir. Fakat maser günümüzde çok yaygın kullanılmamakla beraber, sadece radyo astronomide alıcı olarak gözükmektedir [2]



İlk defa A. L. Schawlow ve C. H. Townes tarafından 1958’de “Infrared and Optical Masers” adlı yayında maserin ışık tayfının görünebilir ve kızılötesi bölgelerinde kullanılabileceği tarif edilmiş ve ortaya çıkan cihaza “optik maser” denilmiştir. Daha sonra bu deyim yerini lazer almıştır. Yakut lazeri ilk olarak Maiman tarafından 16 Mayıs 1960’da sonuç raporları olarak yayınlanmıştır. 1961 yılında Sorokin ve Stevenson U:CaF<sub>2</sub> lazeri ile ilgili çalışmalarını yayınlamışlardır. 1963’de N<sub>2</sub> lazerini 1964’de Geusic YAG lazerini Bridges Ar-Ion lazerini bulmuştur. Geçen yıllar sonunda 1970’de CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>’nin O<sub>2</sub> ile yanarak CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O açığa çıkmasıyla ışımaya yapan ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından gerçekleştirilmiştir [25].

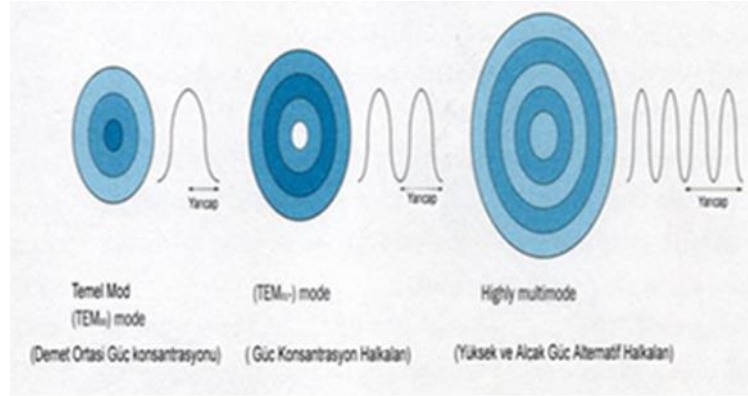
1960’ların sonuna kadar endüstriyel alanda pek kullanılmayan lazer, 1970’lerin ortalarında kesme, kaynak, delme ve markalama işlerinde, ölçme ve daha birçok alanda yerini almıştır. Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, excimer ve iyot lazerleri bulunarak ve geliştirilerek lazer teknolojisi bugün, savunma sanayinden endüstriye, tıp alanından, haberleşme, bilgisayar ve hatta eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılır hale gelmiştir [30].

### **3.1. LAZERİN TEMEL PRENSİPLERİ**

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları birçok enerji düzeyi gösterir ve bu enerji düzeyleri arasında gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye “teşvik edilebilir” ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur [2, 27].

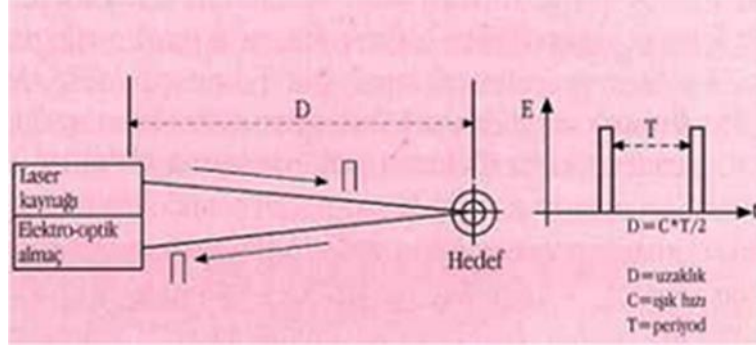
Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır; yani o elementteki atomların elektronları kararlı yörüngeleri olan belli bir enerji düzeyinde bulunurlar. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkararak tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjiyi dışarı salma işlemi lazerin ana prensibini oluşturmaktadır [2, 27].

Eğer atom dalga boyu (rengi) kendisine uygun düşmeyen bir ışık demeti (dalga boyu) ile uyarılmış ise enerjisini kendiliğinden ışını şeklinde yayar. Eğer kendisine tam olarak uygun düşen bir ışık demeti ile uyarılmış ise çok kısa bir sürede yerleştirildiği ışık demeti ile aynı doğrultuda ve daha parlak bir ışık demeti şeklinde ışınır. Bu "bindirilmiş (yükseltilmiş) ışınım" olayıdır. Şekil 3.1'de lazer güç halkalarının çeşitli halleri gösterilmektedir.[2, 27].



Şekil 3.1. Lazer güç halkaları [32].

Lazer kaynağı olarak kullanılan malzemenin (kristal, gaz, sıvı) yapısını oluşturan atomların en son yörüngelerindeki elektronları dışarıdan enerjilendirilerek (pumped) bir üst yörüngeye çıkması sağlanır. Verilen enerji kesildiği zaman elektron tekrar kararlı konumuna geçer (bir alt yörüngeye düşer). Bu sırada kazanmış olduğu enerjiyi foton şeklinde yayar. Yayılan bu enerji lazer kaynağının iki tarafında bulunan yansıtıcı aynalar vasıtasıyla kendi ortamında döndürülür. Bu işlem elektronların tekrar tekrar uyarılması ile devam eder. Böylece eş fazda şiddeti çok artarak uyarılmış ve o atomun frekans (renk) karakteristiklerini taşıyan güçlü bir ışınım (foton demeti) elde edilir. Tek dalga boyunda yoğunlaştırılarak yönlendirilmiş lazer ışığı % 25 geçirgen olan aynadan bir Q anahtarı yardımı ile açığa çıkar. Şekil 3.2'de Q anahtarlı yakut ( $\text{Cr}^{+3}$  Ruby) lazer ile ilgili görsel bulunmaktadır[2].

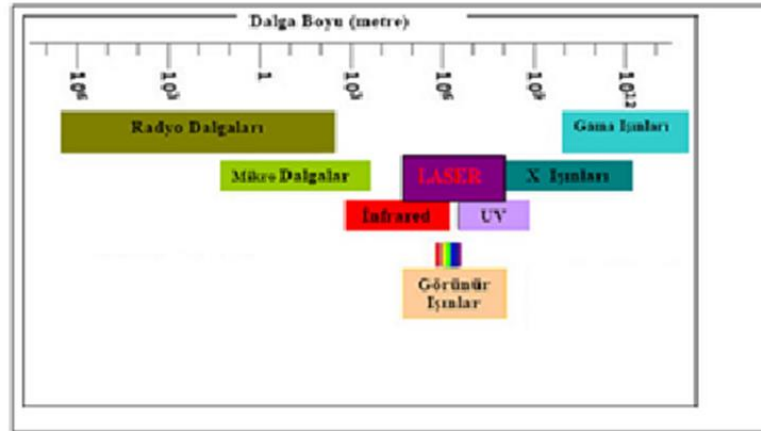


Şekil 3.2. Q anahtarlı yakut (Cr+3 Ruby) lazer [30].

Lazer ışığı üretilen ortamdan birim anahtarlama zamanında açığa çıkan enerjiye Q değeri ve bu işleme Q anahtarlama denir. Q anahtarlama metotları döner aynalar (1000 dönme/sn.), elektro-optik ve akustik optik şekillerinde olabilir. Elektro optik ve akustik optikte çalışma prensibi, polarizasyon kuramlarının çeşitli uygulamalarına dayanır [2, 27].

### 3.2. DALGA BOYU DİYAGRAMINDA LAZERİN YERİ

Kararlı olarak yörüngelerinde bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkarak tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjiyi dışarı salmaktadır bu esnada oluşan ışımalarda çeşitli dalga boyları oluşmaktadır. Şekil 3.3'te ışımaya esnasında oluşan dalga boyları ve lazerin yeri gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Dalga boyları ve lazerin yeri [30].

### 3.3. LAZER ÇEŞİTLERİ

Lazer teknolojisi başlangıç tarihinden itibaren bir çok gelişme gösterekrek çok çeşitli türlele karşımıza çıkmaktadır. Gelişmeler ışığında kullanım alanlarına göre çeşitlerini aşağıda anlatılmaktadır.

#### 3.3.1. Optik Pompalamalı Katı Lazerler

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyararak yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından biri lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olduğundan güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi gerekir. Optik pompalamalı lazerde uygun malzemedan yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve lazer ışığının yansıyabilmesi için ayna ile kaplanmıştır. Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığının bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. Pembe yakut kullanılmıştır. Sonraları birçok toprak elementleri kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimdir. Bu tür lazerden çok güçlü ışık çakımları biçiminde binlerce wattlık güçler elde edilebilir [30].

#### 3.3.2. Sıvı Lazerler

Katı lazerlerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılma ve hasar ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camsı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (ör. Neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi olanaklı olur. Ne var ki inorganik sıvıların pek azı lazerlerde kullanılmaya elverişlidir [30].

### 3.3.3. Boyar Maddeli Lazerler

Bazı organik boyarmaddeler flüorışıma özelliği gösterir. Bir başka deyişle üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlarlar. Atomlarının uyarılmış durumda bulunma süresinin çok kısa (saniyenin kesri kadar) olmasına ve yayımlanan ışığın dar bir bantta toplanmasının olanaklı olmamasına karşılık, boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının nedeni bunların geniş bir frekans bölgesinde ayarlanabilme özelliği göstermesidir. Rodamin 6G gibi boyar maddeler başka bir lazerle uyarılma sonucunda lazer etkisi gösterir. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G, sürekli olarak çalışan (ışığı darbeler biçiminde değil sürekli bir demet olarak veren) ilk lazerin gerçekleştirilmesinde yararlanılan boyarmaddedir. Böylece frekansı ayarlanabilen sürekli bir lazer demetinin elde edilmesi olanaklı olmuştur. Bir başka boyarmadde olan metilumbelliferon, hidroklorik asitle karıştırıldığında ışık tayfının morötesinden sarıya kadar uzanan bölgesinde lazer etkisi gösterir. Böylece tayfin bu bölgesinde istenen dalga boyunda lazer ışığı elde edilebilir [30].

### 3.3.4. Dinamik Gaz Lazerleri

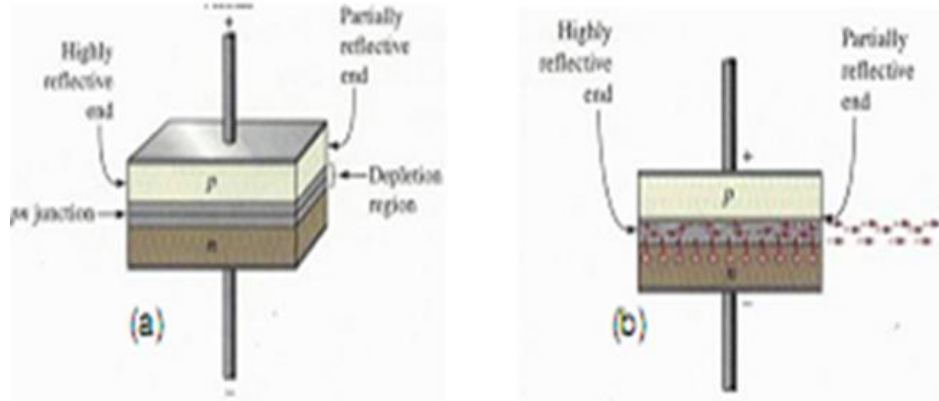
Sıcak bir gaz hızla soğutulursa, alçak enerji düzeylerinin birindeki moleküllerin sayısı daha hızlı azalır yüksek bir düzeydeki moleküllerin sayısının altına düşebilir. Bu durumda lazer etkisi ortaya çıkar. Bu koşul, yanmakta olan ve azotla karıştırılmış karbon monoksitin bir jet (fıskırma) memesinden çıkarken birden genişlemesi sırasında sağlanabilir. Böyle bir lazerden 30.000 W'ın üstünde yüksek güçler elde edilebilmiştir [32].

### 3.3.5. Kimyasal Lazerler

Bazı kimyasal tepkimelerde lazer etkisinin oluşmasına yeterli olacak sayıda yüksek enerjili atomlar ortaya çıkar. Örneğin, hidrojen ve flüor elementleri hidrojen flüorür oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde ortamda bulunan CO<sub>2</sub> gazında lazer etkisi oluşur. Bu tür lazerlerde az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek olanaklıdır [32].

### 3.3.6. Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerde farklı türden katkılanmış iki yarı iletken madde düz bir bitişim oluşturacak biçimde yan yana getirilmiştir. Böyle bir aygıttan yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde lazer ışığı ortaya çıkar. Çıkış güçleri sınırlı olan yarı iletken lazerler, maliyetlerinin düşüklüğü, boyutlarının küçük olması ve verimliliklerinin yüksekliği nedeniyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık ölçme aygıtlarında kullanılır [32]. Şekil 3.4'te yarı iletken lazer oluşumu ve görünümü gösterilmektedir.



Şekil 3.4. a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Yarı iletken lazer oluşumu[32].

### 3.3.7. Lazerlerin Yükselteç Ve Osilatör Olarak Kullanılması

Lazerlerin çoğunda etkin malzeme uzun ve dar bir sütun biçimindedir, bunun iki ucuna birbirine bakan birer ayna yerleştirilmiştir. Aynalar kaldırılırsa bu aygıt, güçlü bir lazer demetini yükselterek daha da güçlü bir lazer demeti oluşturmak amacıyla kullanılabilir. Aynaların varlığı ise aygıtın bir osilatör (titreşim üretici) olarak çalışması sonucunu doğurur [32].

### 3.3.8. Kısa, Güçlü Darbeler Üreten Lazerler

Yükselteç olarak çalışan sütun ile iki uçtaki aynalar arasına yerleştirilen bir engelleyici (obtüratör) kapalıyken lazer etkisi oluşmaz. Lazer etkisinin ortaya çıkması için gerekli koşullar sağlanmışken engelleyici birden açılırsa, sütunda depolanmış durumdaki enerji, saniyenin çok küçük bir kesri kadar süren ve tepe gücü birkaç yüz bin kilowatt olabilen çok güçlü bir ışık darbesi biçiminde açığa çıkar. Bu işleme “Q anahtarlama” denir. Q anahtarı mekanik bir engelleyici olabilir; ama genellikle normal durumda ışık geçirmeyen, bir elektrik darbesi uygulandığında ise saydam duruma geçen sıvı ya da katı bir optik engelleyici kullanılır. Engelleyici olarak, normal durumda ışık geçirmeyen, ama üzerine lazer ışığı düşürüldüğünde saydamlaşan bir boyar maddeden de yararlanılabilir [32].

Bir lazer genellikle birkaç kipte birden (bir başka deyişle, değişik frekanslarda) titreşim yapar. Bu kipler kip kilitlenmesi denen bir yöntemle eş zamanlanabilir. Bu durumda daha da güçlü ve kısa süreli darbeler elde edilir. Böyle darbelerden çok hızlı delik açma işlemlerinde yararlanır. Deliğin açılması o kadar kısa sürede gerçekleşir ki, çevredeki malzeme bu işlemde etkilenmez. Bu tür ışık darbeleri bilimsel araştırmalarda da kullanılır [32].

### 3.3.9. Ayarlanabilir Lazerler

Lazerin değişik frekanslara ayarlanabilmesi bilimsel araştırmalar açısından önemli bir özelliktir; bu olanağı sağlayan lazer türleri arasında geniş bir frekans bandında çalışabilen boyar maddeli lazerler başta gelir. Aynalardan biri yerine yalnızca belirli bir frekanstaki ışığı yansıtan bir ayna (ör. bir kırınım ağı) konarak istenen dalga boyu seçilir. Bazı katı lazerlerde, sıcaklık ve kristalin yönelişi değiştirilerek, dar bir frekans bölgesi içinde ayarlanabilir. Kimi lazerler ise, harmonikler (gelen lazer demeti frekansının tamsayı katları frekanslı demetler) üretebilir. Lityum iyodat kristalinin bu özelliğinden yararlanılarak, kızılötesi ışımdan sudan daha kolay geçebilen yeşil lazer ışığı elde edilir [30].

### 3.3.10. Katı Lazerleri

Kullanılan ilk gereç yakuttur (1960). Bu, % 0.05 oranında üçdeğerli krom iyonları ( $\text{Cr}^{+++}$ ) içeren, saydam bir  $\text{Al}_2\text{O}_3$  alümina kristalidir. Krom iyonlarının enerji düzeylerinin konumu nedeniyle nüfus evirtimine olanak verir. Uygulamada, yapay yakutlardan yontulmuş çubuklar kullanılır. Yayım dalga boyu, kızıl bölgede 694.3nm'dir. Başboş çalışmada bir yakut lazeri 30–40 kW, darbeli çalışmada ise 30 ile 100 MW arası güç sağlar. Neodimli cam, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra ortaya çıkmıştır. Burada, neodim iyonlarıyla ( $\text{Nd}^{+++}$ ) katkılanmış biçimsiz bir malzeme (cam) söz konusudur. Bu, 1060 nm de (yakın kızılötesi) yayım yapan, 4 düzeyli bir malzemedir. Neodimli cam lazerleri yalnızca darbelidir. Bunların birbirinden oldukça farklı iki türü vardır. Askeri uzaklık ölçümde kullanılan küçük lazerler ve plazmaları, çekirdek kaynaşmalarını incelemede kullanılan yüksek güçlü lazerler. İkinci tür lazerler bir lazer yükselteçleri bataryası biçimindedir. YAG (Yttrium Alüminyum Garnet) neodime katkılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Bu gereç sürekli ya da darbeli bir çalışmaya olanak verir. Erbiyum yâda holmiyum iyonları gibi başka malzemeler üzerinde de incelemeler yapılmaktadır [9].

### 3.3.11. Gaz Lazerleri

Ortam çoğu kez bir gaz karışımından oluşur. Karışımındaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla öbürüne aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte, helyum-neon lazerleridir. Bu lazerlerde yayım çizgilerini veren neon gazıdır. En çok kullanılan dalga boyu, kızıl bölgede 632,8 nm'dir. 1150 ve 3390 nm'lik tayf çizgileri de kullanılabilir. İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan gaz lazerleridir. En yaygın olan argon lazeridir. Argon atomları, bir elektrik boşalmasının elektronlarıyla çarpışarak iyonlaşır. Bu lazerlerle çok sayıda tayf sayısı elde edilebilir (mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496.5 nm ve 514.5 nm). Yayımlanan güç yüksektir (onlarca watt). Karbondioksit lazerlerinde,  $\text{CO}_2$  karbondioksit moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışım  $\text{CO}_2$ , azot ve helyumdan oluşur ve uyarma azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli ya da



darbeli olabilen yayım kızılaltı bölgede (10,6  $\mu\text{m}$  ya da 9,6  $\mu\text{m}$ ) yapılıdır. Karbondioksit lazerlerinin % 10 ile % 15 arasında değişen yüksek bir verimi vardır. Maksimum güç, sürekli çalışmada 400 W, kısa darbeli çalışmada ise 10 TW'dir. HF/DF kimyasal lazerler 'de lazer yayımı verecek olan, titreşim yönünden uyarılmış HF ya da DF moleküllerini üretmek için flüor atomunun hidrojen (ya da izotopu döteryum) üzerindeki tepkimesinden yararlanır. En güçlü lazerlerde, flüor atomu, F<sub>2</sub> flüor molekülünün (ya da NF<sub>3</sub> bileşiğinin) özel bir odada hidrojenle (ya da bir hidrokarbonla) yanmasıyla elde edilir. Yayım dalga boyları HFF lazer için 2.7  $\mu\text{m}$ , DF lazer için ise 3.8  $\mu\text{m}$  dolayındadır. DF lazer bugüne dek olan en güçlü sürekli lazerdir. ABD 'de yapılmış bir ilk örnek, 2.2MW lik bir güç sağlanmıştır. Metal buharlı lazerler 'de (en yaygın olanı helyum kadmiyum lazeridir) etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdan oluşur. 100 miliwatt'a kadar olan güçlerde, 441.6 ve 325 nm'lik dalga boylarıyla sürekli çalışma sağlanabilir. En son gerçekleştirilmiş lazer tipi olan iyot lazerlerinde etkin ortam olarak atom halinde iyot kullanılır ve cam lazerinin dalga boyuna yakın, 1315nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayım gerçekleştirilir. Bu tip bir lazer ile 1 TW'lık bir güç sağlanmıştır [9].

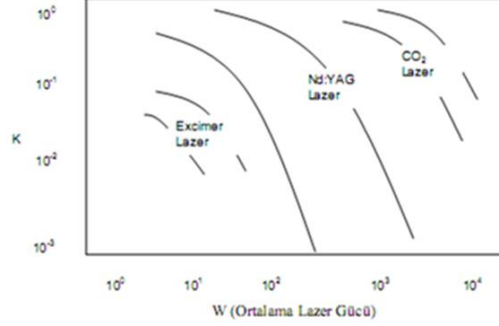
### **3.3.12. Serbest Elektronlu Lazerler**

Bunlar, bir hızlandırıcıdan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit, almaşık bir magnetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli yeğın bir ışımaya kaynağı elde etmeye olanak verir. Elektronların enerjileri ya da magnetik alanın dönemi değiştirilerek, X ışınlarının dalga boylarından, uzak kızılötesinin dalga boylarına kadar değişen dalga boyları elde edilebilir [7].

### **3.4. MOD**

Mod, lazer ışınının yoğunluk değişimi olarak adlandırılmaktadır. K katsayısının (Şekil 3.5) değeri azaldıkça, ışının kalitesini düşmektedir. Dolayısıyla bir lazer ışınının en küçük odak çapına ve en küçük enerji yoğunluğuna sahip olabilmesi için bu temel moda mümkün olduğu kadar yaklaşması gerekmektedir. K katsayısı

azaldıkça lazer ışınının odaklanma yarıçapı büyümekte ve ışın kalitesi azalmaktadır [3]. Şekil 3.5'te Lazer türlerinin K katsayısının karşılaştırılması gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Lazer türlerinin K katsayısının karşılaştırılması [3].

### 3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bir çok alanda kullanıma açık olan bu teknolojinin çeşitleri Çizelge 3.1'de CO<sub>2</sub>, Nd:YAG ve Excimer lazerlerinin parametreler bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması [4].

	<b>Fiber Lazer</b>	<b>CO<sub>2</sub> Lazer</b>	<b>Nd:YAG Lazer</b>
Mak. 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

### 3.6. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ

- Lazer ışığı normal bir ışık kaynağına göre çok yoğun ve şiddetlidir.
- Normal ışık her yöne dağılırken, lazer ışını dağılmaz ve odaklanabilir, sapma toleransı yok denecek kadar azdır. Oldukça düzgün bir ışıktır.

- Lazer ışını tek dalga boyuna sahiptir. Bu özelliğinden dolayı monokromatik bir özellik taşır.
- Lazer ışını, tek renkli ve aynı fazlı paralel dalgalar halinde genliği yüksek bir ışık demetidir.
- Lazer ışını ile yüksek enerjilerde çok hassas işlemler yapılabilir. [32].

### **3.7. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENE BİLİRLİĞİ**

Genel olarak bakıldığında lazer tezgâhında kesme işlemini sağlayan karışım diğer adı ile mix denilen gazlara yardımcı olarak kullanılan soğutucu gazların hepsi ile kesim yapılmaktadır. Hepsinden gerçek verim ve yüzey pürüzlülüğü elde edilmez örneğin paslanmazlar da azot tertemiz bir yüzey ve ölçü tamlığı verirken hava veya oksijenle yapılan kesimlerde istenilen sonuçlar elde edilememektedir [5].

#### **3.7.1. Endüstriyel Çelikler**

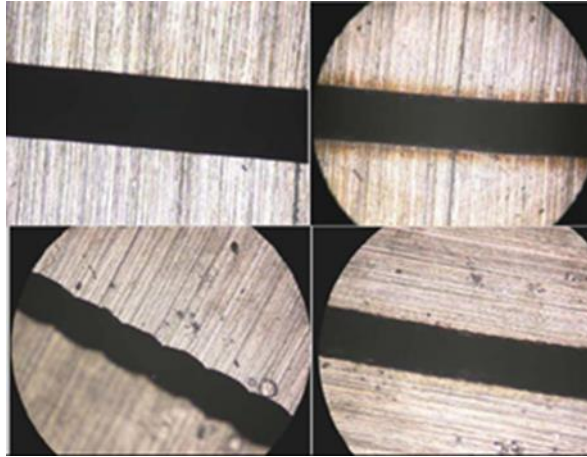
Endüstriyel çeliklerde, kesme gazı olarak oksijen kullanılmaktadır. Lazer tezgâhı sürekli ışın (CW) modunda kullanılır. Bu çeliklerde karbon yüzdesi arttıkça, kesme kenarlarında malzemenin sertleşme özelliği artar ve köşelerde yanık izlerinin oluşumuna sebebiyet verir. Sertleşmenin kesim hızıyla bir ilgisi yoktur. Alaşım oranı fazla malzemelerin kesmek, düşük alaşım oranına sahip malzemeleri kesmekten zordur. Oksijen, kesme gazı olarak kullanıldığından kesme hattında çok az oksitlenme oluşur. Kesme gazı olarak yüksek basınçlı azot kullanılırsa, 4 mm'ye kadar kesim yapmak mümkündür. Bunun sonucu olarak kesim hattında oksitlenme görülmez. Fakat kesim hızı, oksijenle kesim hızıyla kıyaslandığında oldukça yavaştır. Oksijenle kesme hızının % 10 ile % 30'una ulaşılabilir. Oksitli malzemeler ve temiz olmayan malzeme yüzeyleri düşük kesim kalitesine sebebiyet verir. Geometrisi zor olan malzemeler için lazer ünitesi darbeli modunda çalıştırılır. Böylece ince kesitlerdeki bağlantılar ve küçük açılı malzemelerin yanması önlenir. Malzeme yüzeyinde kalan sıcaklık kesim kalitesini olumsuz yönde etkiler. Gerilmelerin giderilmesi gerekmektedir. 15–20 mm arası kalınlıklara sahip küçük ebatlı çelik malzemelerde ince tane yapılı çeliklerin lazerle kesimi daha uygundur. Bu çeliklerin içerisindeki alaşım elementlerinin etkisi önemlidir. Alaşım

elementlerinin en önemlisi karbondur. Karbon dışında silisyum, manganez, kükürt içerebilirler. Krom- nikel ve molibden ilavesiyle korozyon direnci artırılabilir.

Çelikler ihtiva ettikleri alaşımlara göre sınıflandırılabilir. Bunlar;

- Yüksek alaşımlı çelikler
- Düşük alaşımlı çelikler
- Alaşımsız çelikler

Lazer tezgahında kesilen endüstriyel çeliklerin kesim uygulamaları Şekil 3.6'de gösterilmektedir [5].



Şekil 3.6. Lazer ile kesme işleminde kullanılan alaşımlı çelik uygulamaları [16].

### 3.7.2. Paslanmaz Çelik

Bu çeliklerde ve diğer tüm malzemelerde kullanılan lazeri oluşturan gazlar, karbondioksit, azot ve helyum. Baz gazlar 4 ya da 5 bileşen içerebilir. (Ortama, CO<sub>2</sub>, N ve He dışında H, Ne eklenebilir) bu karışım ile birlikte paslanmaz malzemelerde soğutucu gaz olarak görev yapan azot gazı kullanılabilirdiği gibi, oksijen ve hava ile de kesim yapılabilir. Eşit kalınlıktaki paslanmaz çelikte, yüksek basınçlı azot, oksijene ve havaya göre daha hızlı bir kesim sonucu ve daha temiz yüzey kalitesi verir [7].

Azotla kesimde, her kalınlıkta malzeme için farklı focus mesafesi (odak) seçilmelidir. Odak pozisyonunun ayarlanması ve kesim hızının düşürülmesi düzgün kesimi sağlar. Oksijen ve hava ile kesimde farklı focus mesafesi ( odak mesafesi) seçilmesine karşın istenilen yüzey kalitesi ve ölçü tamlığı sağlanamaz. Şekil 3.6'da lazerde kullanılan soğutucu gaz uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Lazerde kullanılan soğutucu gaz uygulamaları: a) Azot ile kesim, b) Hava ile kesim, c) Oksijen ile kesim

Bu çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Paslanmaz çelikler ile ilgili bilgiler 6. bölümde detaylı olarak verilmiştir.

### 3.7.3. Alüminyum

Alüminyum alaşımları, yüksek yansıtma özelliği ve ısı iletkenliğine sahip olmasına rağmen 6 mm kalınlığa kadar kesim işlemi yapılabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının lazer ile kesiminin sürekli modda yapılması tavsiye edilmektedir. Alüminyum alaşımlarının, paslanmaz çelik gibi oksijen ve yüksek basınçlı azot ile kesimi mümkündür. Fakat azot gazının, endüstride kullanımı oksijene göre daha avantajlıdır. Kesme gazı olarak oksijen olarak kullanılması kesim yüzeyinde pürüzlülüğün oluşumuna ve az da olsa çapak oluşumuna sebebiyet verir. Kesimin azot ile yapılmasıyla, kesim yüzeyinde oksijene göre daha temiz bir yüzey elde edilir. 4 mm'ye kadar çapaksız kesim elde edilmektedir. Fakat daha kalın parçalarda çapak oluşumlarına sebebiyet verir bu çapakların temizlenmesi zordur. Saf alüminyumun yüksek yansıtma özelliği nedeniyle 4mm'ye kadar lazer kesimi mümkündür. Fakat kesmek daha zordur [32].

### **3.7.4. Titanyum**

Titanyumda en uygun kesme gazı bir soy gaz olan argondur. Fakat azot da kullanılabilir. Kesim gazı olarak oksijen kullanılmaz. Oksijen ile yapılmak istenirse titanyum yüksek sıcaklıkta yanar [12].

### **3.7.5. Bakır Ve Pirinç**

Bakır ve pirinç yüksek ısı iletkenliği ve yüksek ısı yansıtma özelliklerine sahip olduklarından 3mm'ye kadar kesimleri mümkündür. Bakırın 3mm'ye kadar kesilmesinde kesme gazı olarak oksijen kullanılır. Azot, yüksek yansımaya sebep olmakla beraber ekipmanlara zarar verebilir. Pirinçlerin, 3 mm'ye kadar kesimde, azot ve oksijen kesme gazı olarak kullanılıp, yüksek basınçla işlem yapılır. Oksijen ile yapılan kesimler daha kaliteli olduğundan dolayı avantajlıdır [12].

### **3.7.6. Sentetik Malzemeler**

Sentetik malzeme olarak termoplastik, termoset malzemeler ve sentetik kauçuk malzemeler işlenebilir. Çok yoğun duman çıkmasından dolayı PVC ve polietilen malzemeleri lazer işlerken su jeti kullanılmalıdır. Kesme gazı olarak basıncı 0,5 bardan daha düşük olmak üzere azot kullanılır. Bu yolla daha parlak kesme yüzeyi elde edilebilir [7].

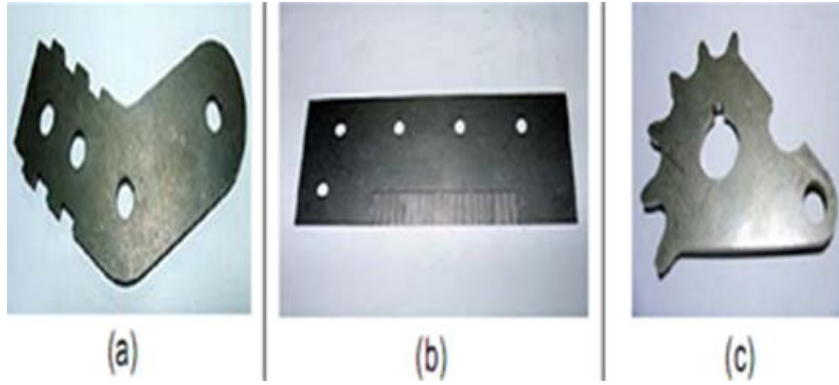
### **3.7.7. Organik Malzemeler**

Tahta, deri, kâğıt lazer ile işlenebilir. İşlenmiş kenarlar, yanmaktan kömür haline gelecektir. Yapışkan tahta işlerken her yapışkan tipi ve çeşidine bağlı olarak temiz bir işleme garantisi elde etmek imkânsızdır [7].

## **3.8. LAZER UYGULAMA ALANLARI**

Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda gün geçtikçe daha da önemli olmaktadır [4]. Şekil 3.3'te lazer uygulamalarını

gösterimi bulunmaktadır. Endüstride, her türlü malzemeyi çok hassas bir şekilde kesme, delme ve kaynak işlemlerinde, mikro elektronikte dirençlerin aktif veya pasif olarak % 0,01 hassasiyetinde üretilmeleri, çip üretiminde hat kalınlıklarının 0,25  $\mu\text{m}$ 'den az olarak desenlendirilmesi, yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün ölçümü, yeni maddelerin analiz işlemlerinin yapılması, yüzey sertleştirme gibi bir çok alan ve sektörde kullanılmaktadır. Şekil 3.7'de lazerde kullanılan soğutucu gaz uygulamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Lazer uygulamaları: a) Açılı kesim, b) Düz kesim, c) Oval kesim [4].

## BÖLÜM 4

### LAZERLERDE KULLANILAN KESME GAZLARI

Lazer ışınıyla kesmenin etkin şekilde yapılabilmesi için lazerle yakarak, eriterek ve buharlaştırarak kesme işlemlerinin her birinin özelliğine uygun kesme gazlarının kullanılması gerekir. Bir kesme gazının görevi, oluşan cürüfları, eriyikleri veya metal buharını kesme yarığında uzaklaştırmak ve odaklama merceğinin kirlenmesini önlemektir [17].

#### 4.1. OKSİJEN

Lazerle yakarak kesme işleminde kullanılan oksijen, kesilen malzeme ile egzotermik reaksiyona girer ve bu reaksiyonun ürettiği ek ısı, kesme hızını artırır. Oksijenin saflığı kesme kalitesine, cüruf birikimine ve çapak oluşumuna büyük etki yapar. Oksijenin saflığındaki örneğin % 99,97'den % 99,5'e bir azalma, lazer ışınıyla yakarak kesme işleminde kesme hızında önemli oranda bir düşüşe neden olur. Oksijen ne kadar saf ise, kesme de o derece hızlı olur. Ancak oksijenin saflığı % 99,5'tan fazla olsa bile, havadaki azotun veya nemin difüzyonu, boru hattının sızdırması, uygun şartlarda olmayan hortumların veya armatürlerin kullanımı nedeniyle saflığı düşebilmekte bu da kesmen kalitesini düşürerek cüruf birikimine neden olmaktadır [5].

#### 4.2. AZOT VE ARGON

Lazerle eriterek veya buharlaştırarak kesmede, erimiş veya buharlaşmış malzemenin kesme yarığında uzaklaştırabilmesi için, soy veya düşük reaksiyon hızına sahip gazların kullanılması gerekir. Bu gazlar için en uygunları argon ve azottur. Bu gazlar, kesme yarığında yanma oluşumunun engellemekte ve kesme yüzeylerinin oksit içermemesini sağlamaktadır. Lazerle yakarak kesmedeki gibi kesme yüzeylerinin sonradan işlenmesine gerek olmamaktadır işçilik maliyetleri düşmektedir. [17].



### **4.3. BASINÇLI KESME GAZI**

Donanıma ek olarak kullanılan kesme gazının basıncı da kesme kalitesini belirleyen bir parametredir. Lazerle yakarak kesme işleminde genel olarak 6 bar basınca sahip oksijen kullanılmaktadır. Ticari olarak mevcut odaklama mercekle, daha yüksek basınçta oksijenin kullanımına izin vermemektedir. Saç kalınlığına ve oksijenin basıncına uygun meme kullanmak gerekir. Oksijen basıncının ve meme çapının optimizasyonu, kesme hızını yükseltmek mümkündür. Oksijen basıncının çok yüksek olması durumunda kesme yüzeylerinde oyuklaşma meydana gelmektedir[5].

### **4.4. KESME GAZI TÜRÜ VE KALİTESİ**

Yakarak kesmede oksijenin saflığı çok önemlidir. Yüksek saflıktaki oksijen ile teknik oksijene göre daha yüksek kesme hızları ve daha kaliteli kesim mümkün olmaktadır. Örneğin oksijen saflığının % 98,8 den % 99.97'ye çıkması kesme hızını % 20 - % 100 arttırmakla birlikte kesim kalitesi de artmaktadır[5].

Kesme noktasında reaktif gaz konsantrasyonunu azaltmak için gaz karışımlarıyla çalışılır. Bu işlem için reaktif gaza inert gaz karıştırılır. Eriyiğin süpürülmesini engelleyen reaksiyon ürünlerinin (örneğin yüksek sıcaklıklarda eriyen krom oksitleri) oluşmasını engellemek için inert gazların kullanılması zorunludur. Birçok çelik malzeme için ise daha ucuz olması bakımından azot kullanılabilir, nitrasyon ile kırılğan yapıya kavuşan veya çatlaklar oluşan çelik türleri için ise Argon kullanılması tavsiye olunur [32].

### **4.5. BASINÇ**

Ayarlanacak gaz basıncı malzemeye ve kesme türüne bağlıdır, inert gaz 'ile çelik kesildiğinde kural olarak basıncın yüksek olması gerekir. Artan malzeme kalınlığına rağmen aynı kesme kalitesinin elde edilebilmesi için daha yüksek gaz basınçları gerekmektedir. [30].

## BÖLÜM 5

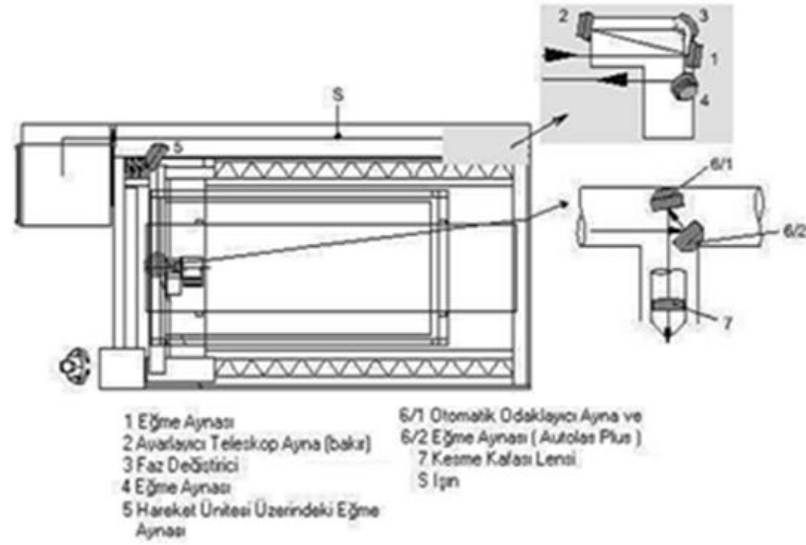
### LAZERLE KESME İŞLEMİ

#### 5.1. CO<sub>2</sub> LAZER TEZGÂHINDA LAZER OLUŞUMU VE İLETİMİ

CO<sub>2</sub> lazer tezgâhlarında lazer, CO<sub>2</sub> gazına elektrik akımı verilerek oluşturulur. Bunun yanında kullanılan azot ve helyum gazı düşük verimde olan CO<sub>2</sub> lazerine eklenerek verim % 30 artırılmaktadır. Gaz karışım oranı  $CO_2 / N_2 = 0,81$ 'dir. Lazer ışını tezgâhın rezonatör bölümünde cam tüpler içinde 10m'ye yakın bir mesafe kat eder. Bu tüplerden gaz geçerken iki ucu arasından elektrik akımı verilerek lazer ışını oluşturulur. Lazerin bir ışın olması sebebiyle aynalar sayesinde yönleri değiştirilebilmektedir. Son olarak lazer ışını kesme kafasına gelmekte burada kesme işlemi yapılmaktadır. Lazer oluşumu için kullanılan gaz silindirlerinin makineye mesafesi ise en fazla 10m kadar olmalıdır. Uygulama basıncı 6–10 bar'dır [12].

Endüstriyel lazerlerin birçoğunda, lazer ışınının oluşabilmesi için özel gazların kullanılması gereklidir. Gazın kalitesi ve seçimi, lazerin güvenilirliğini ve işlemin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Lazer gazları genellikle, yüksek saflıkta özel gazlardır. Lazer gazları, makineye ayrı ayrı tüplerde ya da önceden belli oranlarda karıştırılmış olarak verilmektedir. Bu ön karıştırma ya da gazların ayrı tüplerde verilmesindeki işlem parametreleri (gaz debisi, basınç saflığı vb.) her lazer makinesi üreticisi tarafından belirlenmekte ve o şartlarda makineye verilmektedir [12].

CO<sub>2</sub> lazerini oluşturan gazlar CO<sub>2</sub>, azot ve helyumdur. Bazı lazer gazları 4 ya da 5 bileşen içerebilir (Ortama CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ve helyumun dışında CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub> ve Ne eklenebilir) [12]. Şekil 5.1'de Lazer ışınının tezgâh üzerinde izlemiş olduğu yol gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Lazer ışınının tezgâh üzerinde izlemiş olduğu yol [12]

## 5.2. LAZERLE KESME İŞLEMİ

CO<sub>2</sub> lazer tezgahlarıyla kesme işlemi yöntem itibariyle geleneksel olmayan imalat yöntemleriyle arasında bulunmaktadır. bu teknolojinin yöntemi, avantaj ve deavantajları bu yöntemi ve benzeri sistemlerin önemini artırmaktadır.

### 5.2.1. Kesme Yöntemi

Çubuk şeklindeki numune, Struers-Secotom 50 marka otomatik hassas kesme aleti ile 0,025 mm/s hız ve 1900 dev/dak' da elmas disk kullanılarak kesilmiştir. Bu numuneler sırasıyla 400, 800, 1000, 1200, 2000, 4000 elek numaralı MD piano zımpara ile Struers – Tegramin 30 marka otomatik zımparalama ve parlatma cihazı ile zımparalanmıştır. Yüzey çizikleri yeterli seviyede yok edilinceye kadar 1 µm'lik elmas pasta içeren keçede, düşük hızda parlatılmıştır. Mikroyapı incelemelerinin daha iyi anlaşılması ve malzeme içerisindeki faz dağılımlarının incelenmesi için ASTM E407-07 standardına göre Kroll's solüsyonu hazırlanmıştır. 3ml HF, 6ml HNO<sub>3</sub>, 100ml H<sub>2</sub>O çözeltisi ile numune yüzeyleri 15s dağlanmıştır. İşlemlerin bitiminden sonra Nikon marka Epiphot 200 model optik metal mikroskopunda çeşitli büyütmelerde mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

## 5.2.2. CO<sub>2</sub> Lazer Tezgâhının Avantajları Ve Dezavantajları

### Maliyet Avantajı

- Lazer teknolojisi ile yüksek işleme hızına ulaşılmakta ve birim maliyet düşmektedir.
- Parça imalatında kalıp maliyeti yoktur.
- Aynı plaka sac üzerinden birbirinden farklı parçalar işlenebilir.
- Fire oranı minimum seviyeye indirilir.
- İşlenecek parçaların uygun olması durumunda ortak yüzeyler beraber kesilerek maliyet azaltılabilir.
- Büküm eksenleri markalanarak sonraki imalat aşamaları hızlandırılır ve maliyetler düşürülür.

### Kalite Avantajı

- Lazer teknoloji ile çapaksız bir kesim sağlanır ve ısı deformasyonu minimum seviyedir.
- Preste oluşan sac deformasyonları yoktur.
- Lazer teknolojisi ile sac kalınlığının 0,4 katı çapındaki delikler işlenebilir.
- 0,05 mm hassasiyet ile parçalar kesilir.
- Her türlü yazı, resim, amblem sac üzerinden kesilebilir.
- Zaman Avantajı
- Fiyatlandırma ve kesim işi kısa sürede yapılarak bir adım önde olmanız sağlanır[27, 32].

### Dezavantajlar

- Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Isıl işlemde kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar.
- Sınırlı kalınlık/çap oranı ( $H/D=10$ ) [27, 32].

### 5.3. LAZER IŞINI İLE KESMEDE İŞ GÜVENLİĞİ

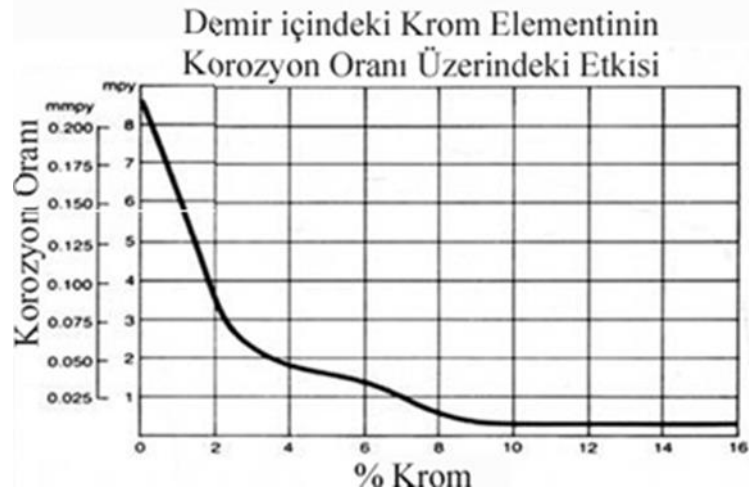
Kesme işlemi esnasında kesim ağzından ve malzeme yüzeyinden yüksek güç yoğunluğunda ikincil ışınlar yayılmaktadır. Çalışma kabini içinde çalışılan lazerin dalga boyuna uygun koruyucu gözlükler bulundurulmalıdır. Kesme esnasında sıcaklık etkisiyle oluşan ısı ışınımı gözleri doğrudan etkileyebilir. Bu yüzden renkli cam kullanılmalıdır. Kesme işlemi esnasında toksit ve karzinogen maddeler oluşmaktadır. Özellikle yüksek alaşımlı çeliklerin kesiminde ağır metal aerosolleri oluşmaktadır. Bunların uygun bir havalandırma sistemi ile ortamdan emilip filtre edilmesi gerekir. Makine değerlerinin altında kalınmalıdır, böylece sağlığı tehdit edecek bir durum oluşmaz [32].

Lazer ışını ile kesme aslında çok sessiz bir kesme yöntemidir. Sadece yüksek basınçlı gaz ile kesmede kabin içinde 100 dB'lik bir ses seviyesi oluşabilir. Koruyucu önlem olarak ses yutucu kulaklık kullanılmalıdır. ZnSe veya GaAs den yapılmış optik elemanlar bakımsızlık sonucu kesme esnasında zarar görürse çok zehirli buharlar oluşmaktadır. Bu yüzden bu elemanların bakımına özellikle dikkat edilmelidir [32].

## BÖLÜM 6

### PASLANMAZ ÇELİK

Metalürjide paslanmaz çelik, minimum % 10,5 krom elementi içeren bir demir karbon alaşımı olarak tarif edilir. Krom elementi aşağıdaki şekilde de görüldüğü üzere çeliği paslanmaya karşı koruyan temel bileşendir. İsmi bu çeliklerin, diğer çelikler gibi lekelenmemesi, korozyona uğramaması ve paslanmamasından almaktadır. Bu malzeme aynı zamanda, alaşım tipi ve kaliteleriyle detaylandırılmamış şekliyle, özellikle havacılık endüstrisinde korozyon dayanımlı çelik olarak da adlandırılır. Günümüzde, ürünün ömrü boyunca uygulandığı zorlu çevre şartlarında problemsiz bir şekilde çalışan birçok farklı ve kolayca ulaşılabilecek kalitelerde ve yüzey özelliklerinde paslanmaz çeliklere ulaşmak çok kolaydır. Normal günlük yaşamımızda dahi her an çatal-bıçaklardan saatlere kadar bu ürünlerin çok geniş bir şekilde kullanıldığını görürüz [23]. Şekil 6.1’de krom oranının korozyona etkisi gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Krom Oranın Korozyona Etkisi[23].

Paslanmaz çelik birçok doğal ve insan yapımı ortamda, korozyona ve oksitlenmeye karşı yüksek bir dirence sahiptir. Fakat her bir özel uygulama için doğru kalite ve tipteki paslanmaz çeliğin seçilmesi çok büyük önem taşır. Kalite seçiminde ilk adım, tasarım aşamasında paslanmaz çeliğin maruz kalacağı olası ve var olan tüm çalışma şartlarının detaylı bir şekilde analiz edilip, tanımlanmasıyla başlar.

Normal oda sıcaklığında ve hava şartlarında yüksek oksitlenme direnci, minimum % 13 (ağırlık olarak), çok sert ve zor çevre şartlarında % 30 'a kadar krom ilavesiyle başılır. Paslanmaz çelikteki krom elementi oksijene maruz kaldığı zaman (normal atmosferde bulunan oksijen kastedilmektedir) hemen krom-oksit ( $Cr_2O_3$ ) pasivasyon tabakası oluşturur. Bu katman gözle görülemeyecek kadar incedir ve ürünü oluşturan metale (paslanmaz çeliğin) su veya herhangi bir gaz, oksijen nüfuzunu tamamen engelleyerek, örttüğü metali korur. Ayrıca, bu katmanın herhangi bir nedenle yırtılması, açılması veya çizilmesi durumunda oluşacak açıklık, çok hızlı bir şekilde tekrar katmanın kendisini yenilemesiyle tekrardan oluşur. Bu olaya pasivasyon adı verilir ve titanyum gibi bazı diğer metallerde de görülür. Nikel elementi de, diğer düşük oranlarda kullanılan molibden ve vanadyum gibi elementler gibi pasivasyon özelliğine katkı sağlar. Paslanmaz çeliğin korozyona ve lekelenmeye karşı olan direnci, onu ticari olarak geniş bir uygulama alanında, düşük bakım maliyeti, diğerleriyle karşılaştırıldığında daha ucuz olması ve göz alıcı bir görünüme sahip olması nedeniyle ideal ve vazgeçilmez bir malzeme kılar. Toplamda 150 'nine üzerinde paslanmaz çelik kalitesi olmasına rağmen, bunlar arasında 15 tanesi çok kullanılan ve piyasada çok tanınan paslanmaz çeliklerdir. Paslanmaz çelikler akrabaları olan diğer çelikler gibi, yassı ürün olarak, plaka olarak, çubuk olarak, tel olarak, boru olarak, şekilli uzun ürünler olarak gibi birçok şekilde soğuk ve sıcak haddeleme yöntemleri ve döküm parçaları olarak üretilmektedir. Gıda endüstrisinde, tıpta, cerrahi donanımlarda, endüstriyel donanımlarda, otomotivde, beyaz eşyada, yapılarda ve yapı elemanlarında, binalarda gibi birçok alanda geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Paslanmaz çeliklerin kullanıldığı alanlardan biri de mücevher ve saat gibi günlük yaşamımızda yanımızdan hiç ayırmadığımız ürünlerde de kullanılır. Mücevherlerde kullanılan en yaygın kalite 316L 'dir. Paslanmaz çelik gümüş gibi zamanla oksitlenme ve kararma yapmaz. Ayrıca paslanmaz çeliğin yoğunluğu gümüşe oranla biraz daha hafif olmasında dolayı tasarımcılara kolaylık sağlar [20].

Paslanmaz çelik % 100 geri dönüştürülebilir. Kullanılan paslanmaz çeliğin % 60'ı ömrünü tamamlamış ürünlerden alınan paslanmaz çelikler ve üretim süreçlerinin, hurdaları gibi geri dönüştürülen malzemelerin tekrardan değerlendirilmesiyle üretilmektedir. Antik çağlardan günümüze birkaç korozyon dayanımlı demir ulaşmayı başarmıştır. Bunun en ünlü ve en büyük örneği Hindistan 'ın Delhi kentindeki, Kumara Gupta I tarafından 400 'lü yıllarda yaptırılan "Delhi 'nine Dikili Demiri" 'dir. Fakat paslanmaz çeliğe benzemeyen bir şekilde bu demir anıt paslanmazlık özelliğini kromdan değil, içerdiği yüksek fosfordan almaktadır. Fosfor uygun yöresel hava şartlarıyla birlikte anıtın yüzeyinde, demir-oksit ve fosfordan oluşan bir koruyucu yüzey tabakası oluşturup demirin korozyona karşı direncini sağlamaktadır. Demir-krom alaşımlarının korozyona karşı olan direnci ilk defa 1821 yılında Fransız metalürjist Pierre Berthier tarafından farkına varılmıştır. O dönemdeki teknoloji krom ile demiri bugünkü gibi işleme tabii tutabilmeye yetmediği için pratik olarak kullanıma geçilememiştir [20]. Düşük kesme hızı 75 m/dak değerinde Ff ve Fr birbirine yakın değerlerdeyken, kesme hızının artmasıyla aralarındaki farkta artmıştır. Esas kesme kuvvetinin, ilerleme miktarının artmasına bağlı olarak değişim oranı, diğer kesme kuvveti bileşenlerine kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

1890 'larda Alman Hans Goldschmidt karbonsuz krom üretimin yolunu açan alimnotermik yöntemini bulmuştur. Bu tarihten itibaren paslanmaz çelik üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Modern paslanmaz çeliklerin başlangıcı, 1913 yıllarında İngiliz metalürjist Harry Brearly tarafından rastlantısal olarak tüfek namlularını geliştirmek için araştırma yaparken keşfedilerek başlamıştır. Bu da paslanmaz çeliğin başlangıç noktası olmuştur. Daha sonrasındaki çalışmalarda, 18-8 olarak nitelendirilen (AISI 304) östenitik paslanmaz çelik yaklaşık 1920'li yıllarda piyasaya çıkmış ve uygulamalarında büyük bir başarı sağlanmıştır. 1930'lardan itibaren paslanmaz çelik endüstride ve günlük hayatımızda vazgeçilmez bir yer almıştır. Bu gelişmeleri diğer alaşım elementleri ile sürdüren araştırmacılar, bugün tanıdığımız paslanmaz çelik kalitelerini zamanla geliştirmişlerdir. Dupleks paslanmaz çelikler bundan yaklaşık 70 yıl önce, sülfür kâğıt endüstrisinde kullanım amaçlı olarak geliştirilmiştir. Dupleks alaşımlar ilk etapta klorit yatak soğutma sularının ve diğer



keskin kimyasal proses sıvılarının yol açtığı korozyon problemiyle başa çıkabilmek için kullanıldı. 1970 'lerdeki Kuzey Denizindeki gaz ve petrol istasyonlarının gelişimiyle, ikinci bir kuşak dubleks paslanmaz çelik geliştirildi. Buna göre belirli bir oranda nitrojen ilavesi, tokluğu, kaynaklanabilmeyi, klorit korozyon dayanımını artırmıştır. En yaygın olarak kullanılan UNS S31803 olarak adlandırılan karışık kompozisyon 1996 yılında dubleks çelik UNS S32205 standartlaştırılmıştır. [20]. II. Dünya Savaşı esnasında, yapılan araştırmalarla çökmeyle sertleştirilen paslanmaz çelikler keşfedilmiştir. Standart olmayan bu kalitelerin ilk örneği 1948 yılında 17-7PH olarak adlandırılan paslanmaz çelik olmuştur.

Şekil 6.5'de görüldüğü üzere tüm kesme hızı değerlerinde en yüksek kesme kuvveti bileşeninin esas kesme kuvveti ( $F_c$ ) ve sonrasında sırasıyla  $F_f$  ve  $F_r$  kuvvet bileşenlerinin olduğu görülmektedir. Düşük kesme hızı 75 m/dak ve ilerleme miktarı 0,15 mm/dev değerinde  $F_f$  ve  $F_r$  birbirine çok yakın değerlerdeyken ilerleme miktarının artması ile aralarındaki farkın kapandığı hatta neredeyse aynı değere ulaştığı tespit edilmiştir. Kesme hızının artmasıyla  $F_f$  ve  $F_r$  kuvvet bileşenleri arasındaki farkın arttığı ve esas kesme kuvvetinin ilerleme miktarının artmasına bağlı olarak değişim oranı,  $F_f$  ve  $F_r$  kuvvet bileşenlerine kıyasla daha fazla değerlerde olduğu tespit edilmiştir. İlerleme miktarına bağlı olarak esas kesme kuvvetinde meydana gelen değişim grafiği çizilerek Şekil 6.6' da verilmiştir.

Paslanmaz Çelik Çeşitleri Paslanmaz çeliğin değişik çeşitleri vardır. Örneğin nikel ilave edildiğinde demirin östenitik mikro yapısı istikrarlı hale gelir. Bu kristal yapı çeliği manyetik olmayan, düşük sıcaklıklarda daha az kırılğan olan bir çelik haline getirir. Daha yüksek sertlik ve mukavemet için içerdiği karbon miktarı artırılır. Isıl işlemlerle birlikte bu çelikler jilet, bıçak ve kesici uçlar gibi birçok üründe kullanılabilir. Mangan da birçok çelikte değişik oranlarda bulunur ve nikelin vermiş olduğu östenitik yapının korunmasına, daha düşük maliyetlerle yardımcı olur [20].

Paslanmaz çelikler kristal mikro yapılarına göre beş grupta sınıflandırılırlar:

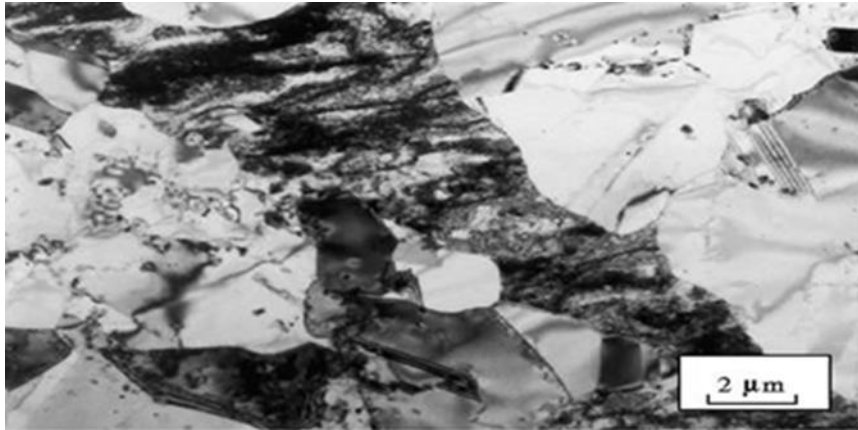
- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik Paslanmaz Çelikler
- Martensitik Paslanmaz Çelikler

- Dupleks Paslanmaz çelikler

Şekil 6.7’de değerlendirildiğinde kesme hızı ve ilerleme miktarının artması ile takımda meydana gelen hazarın arttığı gözlemlenmiştir. Kesme hızı ve ilerleme miktarı arttıkça ortamda oluşan ısı miktarı da artmaktadır. Titanyum alaşımları düşük ısı iletim katsayısına sahip oldukları için oluşan bu ısıyı ortamdan uzaklaştıramadığı ve meydana gelen yüksek ısı ve basıncın etkisi ile takımda meydana gelen hazar miktarının arttığı gözlenmiştir.

### 6.1. ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

300 serisi veya östenitik paslanmaz çelikler dünya toplam paslanmaz çelik üretiminin yaklaşık % 60’ini oluştururlar. Maksimum % 0,15 karbon, minimum % 16 krom ve östenitik yapıyı çok düşük sıcaklıklardan ergime sıcaklığına kadar kararlı kılmak amacıyla yeterli miktarda nikel ve/veya mangan içerirler. En çok bilinen türü 18/10 (AISI 304 kalite) paslanmaz çelik olarak tanınan ve %18 krom ve % 8 nikel içeren çeliktir. AL-6XN ve 254SMO gibi “süperöstenitik” paslanmaz çelik olarak bilinen çelikler içerdikleri yüksek molibden ( $> \% 6$ ) ve nitrojen ilaveleriyle ve yüksek nikelin gösterdiği yüksek stres korozyon direnci sayesinde çok etkin bir klorit çekirdeklenme ve çatlama korozyonu direnci gösterirler. Östenitik paslanmaz çelikler manyetik değildirler ve ısıl işleme tabii tutulamazlar, süneklik özellikleri yüksektir, haddelenmeyle sertleştirilebilirler ve mükemmel bir korozyon dayanımına, işlenebilirlik özelliğine ve kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptirler[21]. Şekil 6.2. östenitik yapı gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Östenitik Yapı [21].

## 6.2. FERRİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

Ferritik paslanmaz çelikler genelde nikel içermeyip yüksek krom içeren (% 10,5 ile % 30 arasında), molibden, titanyum vanadyum gibi karbür yapıcı ve ferritik yapıyı istikrarlı kılan alaşım elementleri içeren bir paslanmaz çelik gurubudur. Genelde içerdikleri yüksek krom oranı, ferritlere çok yüksek bir korozyon direnci sağlar. Daha çok yakın akrabaları olan karbon çeliklerin özelliklerine yakın mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan ferritik paslanmaz çelikler, östenitiklerin tersin manyetikler, düşük karbon içerikleri nedeniyle ısıtılma işlemi tabii tutulamazlar ve kolayca haddelenebilirler. Bu tür çeliklere tek uygulanabilen ısıtılma işlemi tavlama işlemidir. Son zamanlarda alaşım elementlerinde, özellikle nikelde, yaşanan aşırı fiyat yükselişi ve değişkenliği, ferritiklerin geliştirilmesine hız kazandırmış olup, düşük maliyetle östenitikler kadar korozyona dayanımlı yeni, geniş bir kullanım alanına sahip ve maliyeti çok daha düşük ferritik kaliteler de geliştirilmiştir. En yaygın olarak bilinen ferritik kaliteler 430 ve 442 'dir. Ferritiklerin yapıları BCC 'dir [21]. Şekil 6.3'te % 12 Krom içeren ferritik bir mikro yapı, Şekil 6.4.'de ise % 18 krom ve % 0,03 karbon içeren bir ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı görülmektedir.



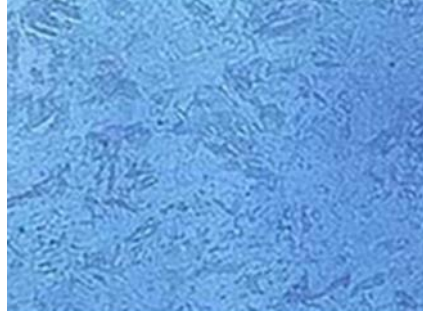
Şekil 6.3. % 12 Krom içeren ferritik bir mikro yapı görülmektedir. Küçük karbür parçacıkları da mevcuttur. Malzeme tavllanmış bir malzemedir (x500).



Şekil 6.4. % 18 krom ve % 0,03 karbon içeren bir ferritik paslanmaz çeliğin mikro yapısı görülmektedir. 1150 °C ‘den hızlı soğutulmuştur. (x500).

### 6.3. MARTENSİTİK PASLANMAZ ÇELİKLER

Martensitik paslanmaz çelikler, ferritik çeliklere benzeyen yapılarıyla, düşük alaşım yüksek mukavemetli çeliklere veya karbon çeliklerine benzerler. Fakat içerdiği fazladan karbon ilavesi nedeniyle, karbon çelikleri gibi ısıl işlemlerle sertleştirilip, mukavemeti artırılabilir. Temel alaşım elementleri: % 12 ile % 15 arası krom, % 0,2 ile % 1,0 arası molibden ve % 0,1 ile % 1,2 arasında karbon ‘dur. Birkaç martensitik kalite haricinde içeriğinde nikel bulunmaz. Yukarıda bir mikro yapı örneği görülen martensitik paslanmaz çelikler manyetiklerdir. Artan karbon oranına bağlı olarak, sertleştirilebilirlikleri ve mukavemetleri artarken, toklukları ve süneklikleri azalır. Yüksek karbon oranına ve diğer alaşım elementlerine bağlı olarak, 60 HRC ‘ye kadar ısıl işlemlerle sertleştirilebilirler. Menevişleme veya temperleme olarak adlandırılan ısıl işlem sonrası stres giderme işleminden sonra, en uygun korozyon dayanımına ulaşılır. Ferritik ve östenitik kalitelerle karşılaştırıldığında korozyona dayanım özelliği martensitik kalitelerin biraz düşüktür. İşlenebilirlik ve şekillenebilirlik özellikleri yüksektir. İçerdikleri alaşım elementlerine ve oranlarına bağlı olarak yapılarında az miktarda kalan östenit yapı olabilir. Martensitik çelikler özellikle mukavemetin ve mekanik aşınmaya karşı direncin, korozyona karşı dirençle birlikte istenildiği alanlarda çok başarıyla uygulanabilir [21]. Şekil 6.5’te martensitik yapı görülmektedir.



Şekil 6.5. Martensitik Yapı Şekil.

#### **6.4. DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER**

Mikro yapılarında genelde eşit oranlarda ferrit ve östenit içeren bu çeliklerin korozyona karşı performansı içerdikleri alaşımlara göre farklılık göstermektedir. Dupleks paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çeliklere göre daha yüksek bir mukavemete sahip olmakla birlikte, bölgesel korozyonlara karşı özellikle çekirdeklenme, çatlak ve stres korozyonuna karşı östenitiklerden daha iyi bir dayanıma sahiptirler. Dupleks kaliteler de % 19 – 28 arasında olan yüksek orandaki krom, % 5 ‘e kadar bulunan molibden ve östenitliklere göre daha düşük oranlarda olan nikel içerikleri sayesinde östenitliklere göre daha mukavemetlidirler. Dupleks paslanmaz çeliklerin en önemli kısıtlayıcı özelliği yüksek sıcaklıklarda ve çok düşük sıcaklıklarda kırılganlaşmalarıdır. Özellikle 300 °C ‘nine üzerinde ve -50 °C ‘nine altında kısa bir süre dahi çalışılırsa, dupleks çelikler kırılganlaşır ve tekrar tavlama ihtiyacı doğar. En yaygın olarak bilinen dupleks paslanmaz çelik kalitesi 2205 kalitedir [21].

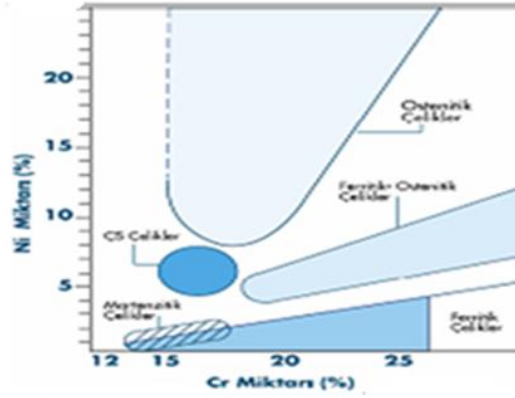
#### **6.5. ÇÖKELMEYLE SERTLEŞTİRİLMİŞ PASLANMAZ ÇELİKLER (PH)**

Yaşlandırmayla sertleştirilen paslanmaz çelikler” olarak da adlandırılan çökeltmeyle sertleştirilmiş paslanmaz çelikler, temelde krom ve nikel içerip, martensitik ve östenitik kalitelerin arasında, her ikisinin de özelliklerini uygun bir şekilde yapısında birleştiren bir paslanmaz çelik türüdür. Martensitik paslanmaz çelikler gibi ısıl işleme yüksek mukavemet kazanabildikleri gibi, östenitik kaliteler gibi de korozyon dayanımına sahiptirler. Sertleştirme, bakır, alüminyum, titanyum, niobium ve molibden gibi alaşım elementlerinin bir veya birkaçının ilavesiyle sağlanır. Bu grupta

en yaygın olarak bilinen kalite 17-4 PH ‘dır. Bu kalite ayrıca 630 olarak da tanınır. Adını % 17 krom ve % 4 nikel içeriğinden alan bu kalite, % 4 bakır ve % 0,3 niobium da içerir [21].

## 6.6. PASLANMAZ ÇELİĞİN TARİHİ

Çökeltiyle sertleştirilmiş paslanmaz çeliklerin bir avantajı da, bu malzemelerin mekanik olarak çalışılmaya, işlenmeye hazır bir şekilde, “işlem görmüş çözelti” şartlarında da temin edilebilmesidir. Mekanik işleme veya üretim sonrasında, çok basitçe bir düşük sıcaklık ısıl işleme uygulanması yoluyla çeliğin mukavemeti istenildiği gibi artırılabilir. Bu işlem düşük sıcaklıkta yapıldığı için, üretilen veya uygulanan malzemede sıcaklığa bağlı bozulmalar veya çarpıklıklar oluşmaz. Şekil 6.6’da Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Değişik paslanmaz çelik türleri için nikel ve krom miktarları [20].

## BÖLÜM 7

### MATERYAL VE METOD

#### 7.1. DENEY NUMUNESİ

CO<sub>2</sub> Lazer tezgâhlarında yansıtıcı özelliği olan malzemelerin kullanımında, yansıma sonucu kırılan ışın operatöre veya lense zarar vermektedir. Lazerle kesimde doğru malzeme seçimi en önemli hususların başında gelir. Yanlış malzeme kullanımı, imalat sürecini olumsuz etkileyebileceği gibi maliyetlerin artmasına, nihai ürün kullanım ömrünün azalmasına ve kullanım giderlerinde artışa neden olabilir. Doğru malzeme seçiminde nihai ürünün kullanım şartlarının çok iyi tanımlanması, malzemenin imalat özelliklerini iyi değerlendirilmesi gerekir. Paslanmaz çelikler çok değişik kalitelere üretilen malzemelerdir. Bu nedenle malzeme seçiminde sadece mekanik ve kimyasal değerler göz önünde bulundurulmamalıdır. Bunun yanında malzemenin boyutları ve yüzey özellikleri gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır. Temin fiyatı ucuz olduğu için tercih edilen bir malzeme, ileriki kullanımda ciddi boyutta olumsuz sonuçlar doğurabilir. Örneğin; AISI 304 kalite paslanmaz çelik kullanılması gereken bir yerde tasarrufa yönelerek siyah sac kullanımı, maliyet açısından bir avantaj sağlıyor gibi görülmese de ürünün kullanım ömrüne olumsuz etki yapması yanında kullanım şartlarına bağlı olarak personel üzerinde yaralanma ve ölümlere neden olabilecek kazalara da yol açabilir. Deneylerde kullanılmak üzere, endüstride yaygın olarak kullanılan, 400 °C'ye kadar yüksek oksidasyon sağlayan, mekanik direnç ve sürtünme mukavemeti çok iyi olan AISI 304 paslanmaz çelik sac seçilmiştir. Mutfak eşyaları, evyeller, ev aletleri, endüstriyel mutfaklar, kimya ve petro-kimya sektörü, gıda sektörü, otomotiv sanayi, eşanjör ve boyler üretiminde AISI 304 paslanmaz çelik yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesmede kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik, östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler grubuna girmektedir. Bu çeliklere korozyon dirençlerini arttırmak için çeşitli alaşım elementleri katılmaktadır. Çeliğin içinde yüksek miktarda krom bulunması zararlı oksitlenmeyi önlemekte, kromla beraber nikel bulunması özellikle asidik ortamlarda yüksek bir korozyon direnci sağlamaktadır. Östenitik krom-nikelli paslanmaz çelikler, bileşimlerinde % 12–25 Cr ve % 8–25 Ni içermektedirler ve antimagnetiktirler.

Ancak yüksek krom ve nikel miktarı bu çeliklerin maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Çok iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler. Östenit oluşturu element nikel, demir-karbon alaşımlarından ferriti hemen hemen yok ederken östenit alanını genişletir. Karbon miktarı % 0,03'den az ise karbür oluşmaz ve çelik oda sıcaklığında tamamen östenitik olarak kalır. Kesme deneylerinde kullanılan 3 mm kalınlığındaki AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi Çizelge 7.1'de, sac malzemeye ait görsel Şekil 7.1'de sunulmuştur.

Çizelge 7.1. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim çizelgesi.

Element	Miktar, %
Azot	0,10 maks.
Demir	65-71 maks.
Fosfor	0,045 maks.
Karbon	0,08 maks.
Krom	18,00-20,00 maks.
Kükürt	0,030 maks.
Mangan	2,0 maks.
Nikel	8,00-12,00 maks.
Silisyum	0,75 maks.



Şekil 7.1. AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac.



## 7.2. LAZER TEZGÂHI

Lazer kesim deneyleri Ostim-Ankara’da yerleşik olan TELMEK A.Ş. firmasında yapılmıştır. Deneyler, en yüksek güç kapasitesi 2500 W olan “Mazak Space Gear” marka CO<sub>2</sub> lazer tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Tezgâh görseli Şekil 7.2’de sunulmuştur.



Şekil 7.2. “Mazak Space Gear”, 2500 W, CO<sub>2</sub> CNC lazer kesim makinası.

Kesme deneylerinde kullanılan CNC lazer kesim tezgâhı ile ilgili teknik özellikler Çizelge 7.2’de görülmektedir.

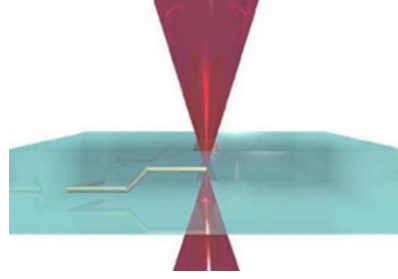
Çizelge 7.2. “Mazak Space Gear”, CO<sub>2</sub> CNC lazer kesim makinası teknik özellikleri.

MAZAK SPACE GEAR		Birim	Değer
Osilatör Gücü		W	2500
Maksimum İş Parçası Ölçüsü		mm	3000 x 1500
Maksimum Yükleme Kapasitesi		Kg	930
X / Y / Z Eksen Hareketleri		mm	3070 / 1545 / 100
Eksen Hızları		m/dak	120
İvmelenme Değeri		G	3
Pozisyonlama Hassasiyeti		mm	± 0,01
Tekrarlama Hassasiyeti		mm	± 0,005
Kesme Kalınlığı	Yumuşak Çelik	mm	22 / 25
	Paslanmaz Çelik	mm	9 / 15
	Alüminyum	mm	8 / 15

### 7. 3. CO<sub>2</sub> LAZER KESİM İŞLEMİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

#### Focus:

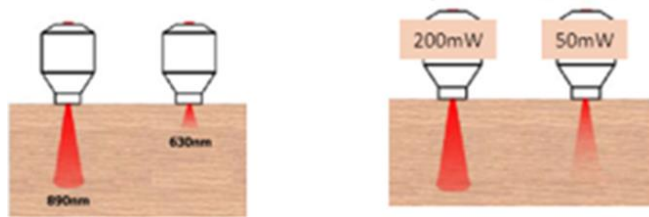
Kesim işleminde en etkili parametrelerden birisidir. Lazer kesme başlığından (nozzle) lazer ışınının odak noktasıdır. Başka bir deyişle, kullanılan merceğin odak noktasıdır. Kesim işleminin sıhhati açısından malzeme cinsi ve kalınlığına bağlı olarak ayarlanabilir bir kesme parametresidir. Şekil 7.3'te focus ayarını gösteren görsel yer almaktadır.



Şekil 7.3. Focus (odak noktası) görseli.

#### Güç:

Lazer kesim işleminde, oluşan lazer ışın demetinin yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Lazer ışın gücü etkisi.

### İlerleme hızı:

Lazer kesim başlığının aksenal yer değiştirme miktarıdır. Birimi zamanda kat edilen yolu gösterir ve birimi “m/dak”dır. Kesilecek malzemeye ait fiziksel ve kimyasal özellikler ilerleme hızının belirlenmesinde etkilidir.

### Yardımcı gaz:

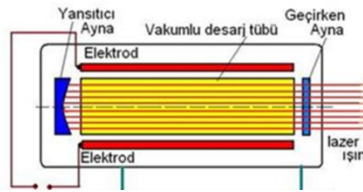
CO<sub>2</sub> lazer kesim işlemlerinde mercek ve iş parçasının soğutulması gerekmektedir. Bu maksatla oksijen, azot, hava ve karışım gazları kullanılmaktadır. Yardımcı gazlar malzeme cinsine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.

### Gaz Basıncı:

Yardımcı gazlar belirli bir basınçta lazer kesim işleminde kullanılmaktadır. Basıncın değişmesi mercek ömrü, kesilen ürüne ait kalite göstergeleri (yüzey kalitesi, ısı tesiri altındaki bölge boyutu, vd.) üzerinde etkilidir.

### Frekans:

Lazer ışın demetinin genişliğidir. Şekil 7.5’te frekans ile ilgili görsel yer almaktadır.



Şekil 7.5. CO<sub>2</sub> Lazer frekans görseli.

### Nozzle:

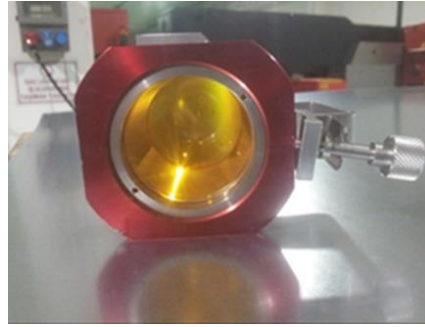
Lazer çıkış memesidir. Kesilecek malzeme kalınlıklarına göre nozzle çıkış ucundaki çap değişmektedir. Nozzle ile ilgili görsel Şekil 7.6'dadır.



Şekil 7.6. Nozzle.

### Mercek:

Mercek ya da lens, lazer ışık yönünü değiştiren (kıran), ışınları birbirine yaklaştıran ya da uzaklaştıran optik alettir (Şekil 7.7).



Şekil 7.7. Lazer merceği/lensi.

## **7.4. KESME DENEY ŞABLONU VE KESME GEOMETRİSİ**

CNC, CO<sub>2</sub> lazer kesim tezgâhında gerçekleştirilen kesme deneylerinde, kullanılan sabit ve değişken parametreler aşağıda Çizelge 7.3'te belirtilmiştir.

Çizelge 7.3. CO<sub>2</sub> lazer kesim tezgâhında gerçekleştirilen kesme deneylerinde, kullanılan sabit ve değişken parametreler.

<b>Sabit Parametreler</b>	
İşleme Tezgâhı	Mazak Space Gear
Duty	% 100
Mercek	7,5''
Nozzle	Ø 3 mm
Malzeme	3 mm AISI 304
<b>Değişken Parametreler</b>	
Güç	Azot, Hava, Oksijen
İlerleme Hızı	1700, 2000, 2400 W
Gaz Basıncı	7, 8, 9 bar
Focus Mesafesi	-2, -1, 0, 1, 2 mm

Lazer kesim deneylerinde, yüzey kalitesini etkileyen değişkenlerin deney şablonunun oluşturulmasında öncelikle kesme işleminin enerji tüketimini etkileyen başlıca parametresi “Güç” değeri ile “focus” parametrelerinin sabit değer olarak belirlenmesine yönelik deney şablonu oluşturulmuştur (Çizelge 7.4). Devamında, diğer değişkenlerin (kesme gazı, ilerleme hızı ve basınç) kesme işlemi sonrası kesme yüzey kalitesine etkilerinin belirlenmesine yönelik ikinci bir deney şablonu tasarlanmıştır (Çizelge 7.5).

Çizelge 7.4. Güç ve Focus değişkenlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik deney şablonu.

<b>Güç ( W )</b>	Değişken (1700, 2000, 2400)
<b>Gaz</b>	Değişken (Azot, Hava, Oksijen)
<b>İlerleme (mm/dak)</b>	Sabit, 1600
<b>Basınç (bar)</b>	Sabit, 9
<b>Focus (mm)</b>	-2, -1, 0, 1, 2

Çizelge 7.4'te Güç ve Focus değerlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik hazırlanan deney şablonunda, ilerleme miktarı ve gaz basıncı sabit tutulmuştur. Literatür incelemeleri ve ön kesme deneyleri ile ilerleme hızının düşürülmesi ve gaz basıncının artırılmasının yüzey kalitesini iyi yönde etkilediği belirlenmiştir. Bu nedenle kesme deneylerinde ilerleme hızının en düşük değeri (1600 m/dak) ve basınç değerinin en yüksek değeri (9 bar) sabit olarak seçilmiştir.

Çizelge 7.5. Yardımcı gaz, basınç ve ilerleme hızı değişkenlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik deney şablonu.

<b>Güç ( W)</b>	Sabit (Çizelge 7.4 sonucu)
<b>Gaz</b>	Değişken (Azot, Hava, Oksijen)
<b>İlerleme (mm/dak)</b>	Değişken (1600, 2000, 2400)
<b>Basınç (bar)</b>	Değişken (7, 8, 9)
<b>Focus (mm)</b>	Sabit (Çizelge 7.4 sonucu)

Çizelge 7.5'te yardımcı gaz, basınç ve ilerleme hızı değişkenlerinin en ideal değerinin belirlenmesine yönelik hazırlanan Çizelge 7.4'te belirtmiş olduğumuz deney şablonuna göre çıkan sonuçlar çerçevesinde, güç ve focus sabit tutularak değişken parametrelerin en ideal kesme koşullarının belirlenmesi sağlanmıştır. İki aşamalı belirlenen lazer kesim deneyleri toplamda 117 adet deneyden oluşmuştur.

#### Kesme Geometrisi:

Kesme deneylerinde kesilen geometri Şekil 7.8'de sunulmuştur.



Şekil 7.8 Deney kesme geometrisi.

## **7.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜM CİHAZI**

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde TR200 Surface Roughness Tester cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz sabitlenen tablası üzerinde aşağı yukarı hareket eden,







## BÖLÜM 8

### DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

Lazerle kesim işlemlerinde ürün kalite göstergesini belirlemede kullanılan yöntemler farklılık arz etmektedir. Bunlar arasında kesilen iş parçası üzerinde boyutsal toleranslara uygunluk, yüzey pürüzlülüğü, kerf boşluğu, çapak (dross) miktarı, termal deformasyon miktarı, vd. sayılabilir. Bu çalışmada lazer kesim işleminin etkinliğinin değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğüne odaklanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüsel farklılıklar, çapaklanmalar, kesilen parçanın işlevselliğinin yerine getirememesine sebebiyet vermektedir. İşletmeler açısından incelendiğinde, bu sorunlar işletmelerin fire olarak adlandırdığı atık sac parçaları artmasına böylelikle birim parça maliyetleri, zaman kayıpları, ek işçilik gibi faktörlerde maliyetlere yansıtılmasına neden olmaktadır.

Lazer kesim deneylerinde, kesme gazı temel değişken alınarak öncelikle kesme işleminin enerji tüketimini etkileyen başlıca parametresi “Güç” ile kesmede en önemli parametrelerden birisi olan “focus” parametresinin sabit değer olarak belirlenmesine yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise çalışmada değişken kesim parametreleri olarak belirlenen diğer parametrelerle (kesme gazı, ilerleme hızı ve basınç) ilgili kesme işlemi sonrası yüzey kalitesine etkilerinin belirlenmesine yönelik kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

#### 8.1. GÜÇ VE FOCUS DEĞERİNİ BELİRLEMeye YÖNELİK DENEY SONUÇLARI

Lazer kesim deneylerinde öncelikle Güç ve focus mesafesi değerlerinin sabitlenmesine yönelik deney şablonu oluşturulmuştur (Çizelge 7.4). Bu şablonun oluşturulmasında literatür ve ön kesim deneylerinde elde edilen bilgiler dikkate

alınmıştır. Deneylerde en yüksek gaz basıncı ve en düşük ilerleme hızı sabit girdiler olarak belirlenmiştir.

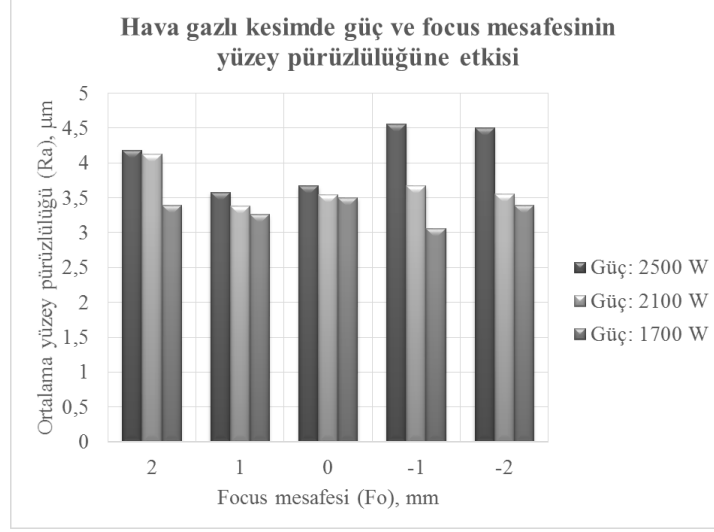
Kesim işlemlerinde kullanılan her bir kesme gazı için değişken Güç ve focus mesafesi ile gerçekleştirilen deneylerde en iyi yüzey pürüzlülük değerini veren işleme koşulları sonraki deneyler açısından sabit değer olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir gaz için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

### 8.1.1. Hava Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları

Hava gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları Çizelge 8.1’de ve bu çizelgedeki değerler kullanılarak elde edilen grafik de Şekil 8.1’de sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.1. Hava gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları.

Gaz	Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Güç ( W)	Focus (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Hava	9	1600	2500	2	4,184
Hava	9	1600	2500	1	3,582
Hava	9	1600	2500	0	3,669
Hava	9	1600	2500	-1	4,559
Hava	9	1600	2500	-2	4,501
Hava	9	1600	2100	2	4,123
Hava	9	1600	2100	1	3,386
Hava	9	1600	2100	0	3,540
Hava	9	1600	2100	-1	3,672
Hava	9	1600	2100	-2	3,551
Hava	9	1600	1700	2	3,399
Hava	9	1600	1700	1	3,263
Hava	9	1600	1700	0	3,505
Hava	9	1600	1700	-1	3,061
Hava	9	1600	1700	-2	3,399



Şekil 8.1. Hava gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.

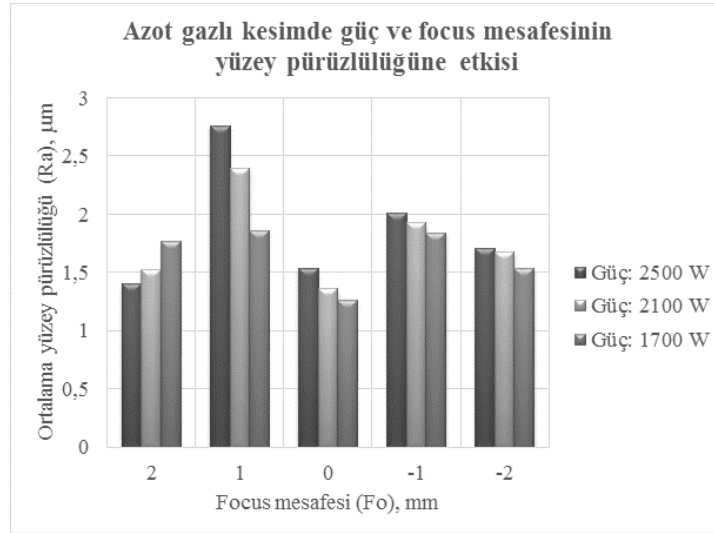
Şekil 8.1 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1700 W güç değerinde -1 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Tüm focus değerlerinde azalan kesme gücü (2500~1700 W) ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Bunun nedeni kesilen yüzeyde ısı etkisi altında kalan bölgenin termal olarak etkilenmesi olarak düşünülmektedir. Benzer durum Öner, Uslan ve diğer birçok araştırmacı tarafından da belirtilmiştir [18, 32-40 ].

### 8.1.2. Azot Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları

Azot gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları Çizelge 8.2’de ve bu çizelgedeki değerler kullanılarak elde edilen grafik de Şekil 8.2’de sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.2. Azot gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları.

Gaz	Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Güç ( W)	Focus (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Azot	9	1600	2500	2	1,406
Azot	9	1600	2500	1	2,760
Azot	9	1600	2500	0	1,538
Azot	9	1600	2500	-1	2,005
Azot	9	1600	2500	-2	1,703
Azot	9	1600	2100	2	1,524
Azot	9	1600	2100	1	2,396
Azot	9	1600	2100	0	1,360
Azot	9	1600	2100	-1	1,928
Azot	9	1600	2100	-2	1,674
Azot	9	1600	1700	2	1,762
Azot	9	1600	1700	1	1,859
Azot	9	1600	1700	0	1,261
Azot	9	1600	1700	-1	1,836
Azot	9	1600	1700	-2	1,536



Şekil 8.2. Azot gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.

Şekil 8.2 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1700 W güç değerinde 0 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Focus değerlerinden 1, 0, -1 ve -2’de azalan kesme gücü (2500~1700 W) ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği focus değeri 2’de ise durumun tersine döndüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni, odak noktasının yukarı yönlü artmasıyla birlikte kesilen

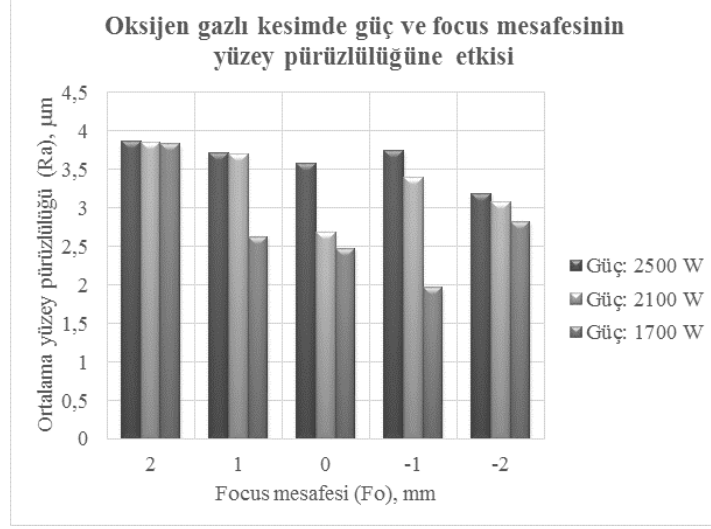
yüzeyde ısı etkisinin yüzey kalitesi üzerindeki kötü etkisinin azalmasına bağlanmıştır.

### 8.1.3. Oksijen Gazı ile Kesimde Güç ve Focus Belirlemeye Yönelik Deney Sonuçları

Oksijen gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları Çizelge 8.3'de ve bu çizelgedeki değerler kullanılarak elde edilen grafik de Şekil 8.3'de sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.

Çizelge 8.3. Oksijen gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları.

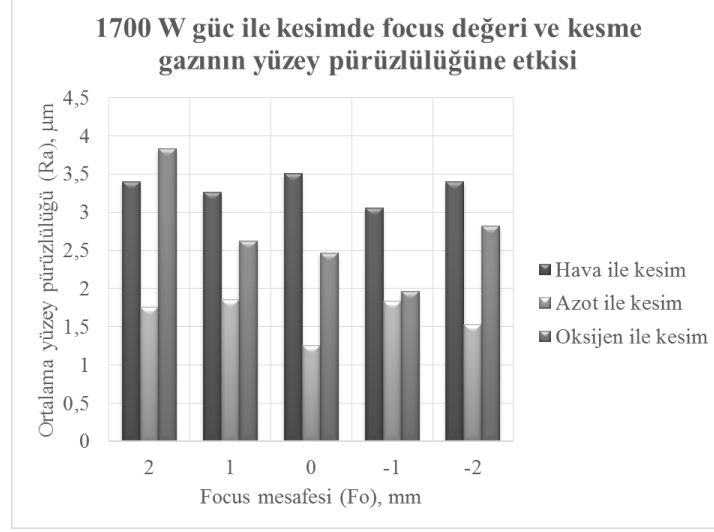
Gaz	Basınç (Bar)	İlerleme (mm/dak)	Güç ( W)	Focus (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
Oksijen	9	1600	2500	2	3,862
Oksijen	9	1600	2500	1	3,709
Oksijen	9	1600	2500	0	3,572
Oksijen	9	1600	2500	-1	3,739
Oksijen	9	1600	2500	-2	3,190
Oksijen	9	1600	2100	2	3,847
Oksijen	9	1600	2100	1	3,704
Oksijen	9	1600	2100	0	2,686
Oksijen	9	1600	2100	-1	3,402
Oksijen	9	1600	2100	-2	3,072
Oksijen	9	1600	1700	2	3,862
Oksijen	9	1600	1700	1	3,709
Oksijen	9	1600	1700	0	3,572
Oksijen	9	1600	1700	-1	3,739
Oksijen	9	1600	1700	-2	3,190



Şekil 8.3. Oksijen gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.

Oksijen gazı ile gerçekleştirilen kesme deneylerinde de Azot gazı ile gerçekleştirilen kesme deneylerinde olduğu gibi azalan güç değerleri ile birlikte tüm focus değerlerinde kesilen yüzeydeki yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Güç en önemli parametre iken focus değeri ise sadece düşük kesme gücünde etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 8.3 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğünün, 1700 W güç değerinde ve -1 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında en ideal kesme gücünün 1700 W güç değeri olduğu tespit edilmiştir. Bu güç değeri dikkate alınarak kesme gazlarına bağlı en iyi focus mesafesini gösteren grafik Şekil 8.4'te yer almaktadır.



Şekil 8.4. 1700 W kesme gücünde focus mesafesinin belirlenmesine yönelik deney grafiği.

Şekil 8.4 incelendiğinde 1700 W kesme gücünde en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği işleme parametrelerinin Azot gazı ile kesimde 0 mm focus mesafesinde olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç azot gazının asal gaz olması ve diğer gazlara kıyasla soğutucu akışkan görevi görmesine bağlanmıştır.

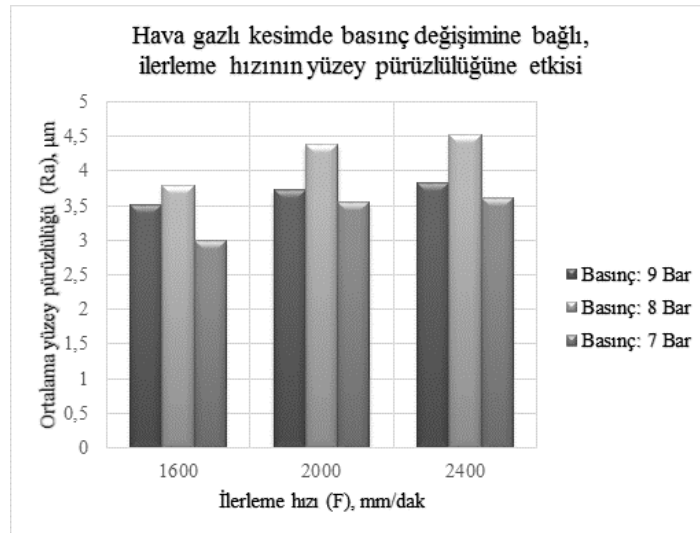
## 8.2. KESME GAZINA BAĞLI OLARAK İLERLEME HIZI VE GAZ BASINCININ YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

İlerleme ve basınç birçok tezgâhta olduğu gibi lazer tezgâhlarında da kesme ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde büyük etkiye sahip bir parametredir. Birçok bilim insanı bu parametreler üzerine çeşitli araştırmalar yapmıştır, bizde bu çalışmamızda lazer tezgâhlarında ilerleme ile basıncın etkileşimi değerlendirdik. Çizelge 8.4'de Hava gazlı kesimde basınç değerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin belirlendiği deney şablonu görülmektedir. Şekil 8.5'te deney sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini gösterimi bulunmaktadır.



Çizelge 8.4. Hava gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları.

Gaz	Güç ( W)	Focus (mm)	İlerleme (mm/dak)	Basınç (Bar)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )
Hava	1700	0	1600	9	3,505
Hava	1700	0	2000	9	3,725
Hava	1700	0	2400	9	3,826
Hava	1700	0	1600	8	3,793
Hava	1700	0	2000	8	4,379
Hava	1700	0	2400	8	3,514
Hava	1700	0	1600	7	2,994
Hava	1700	0	2000	7	3,543
Hava	1700	0	2400	7	3,619



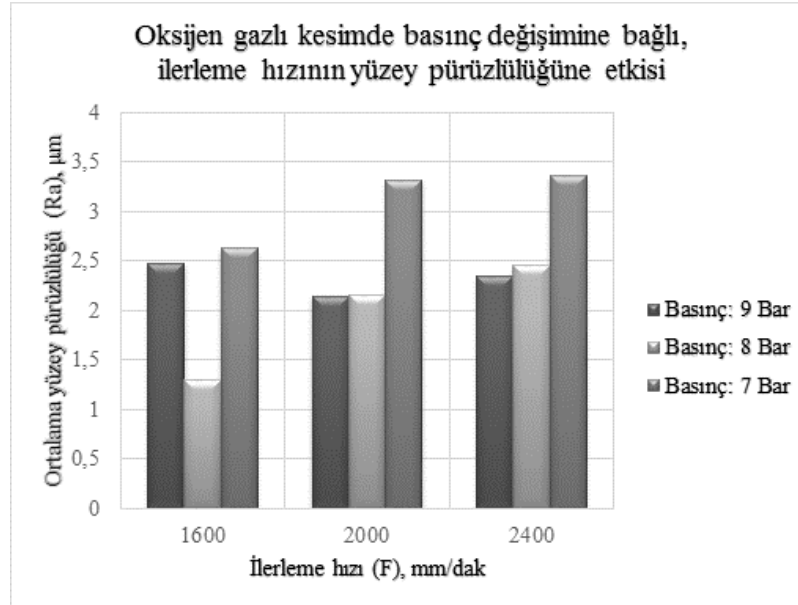
Şekil 8.5. Hava gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

Şekil 8.5'te yardımcı gaz olarak seçilen hava 7 bar basınç ve 1600 mm/dak İlerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. Ayrıca ilerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün tüm basınç değerlerinde kötüleştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 8.5'te Oksijen gazlı kesimde basınç değerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin belirlendiği deney şablonu görülmektedir. Şekil 8.6'da deney sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini gösterimi bulunmaktadır.

Çizelge 8.5. Oksijen gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları.

Gaz	Güç (W)	Focus (mm)	İlerleme (mm/dak)	Basınç (Bar)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )
Oksijen	1700	0	1600	9	2,47
Oksijen	1700	0	2000	9	2,14
Oksijen	1700	0	2400	9	2,34
Oksijen	1700	0	1600	8	1,291
Oksijen	1700	0	2000	8	2,149
Oksijen	1700	0	2400	8	2,447
Oksijen	1700	0	1600	7	2,621
Oksijen	1700	0	2000	7	3,351
Oksijen	1700	0	2400	7	3,351



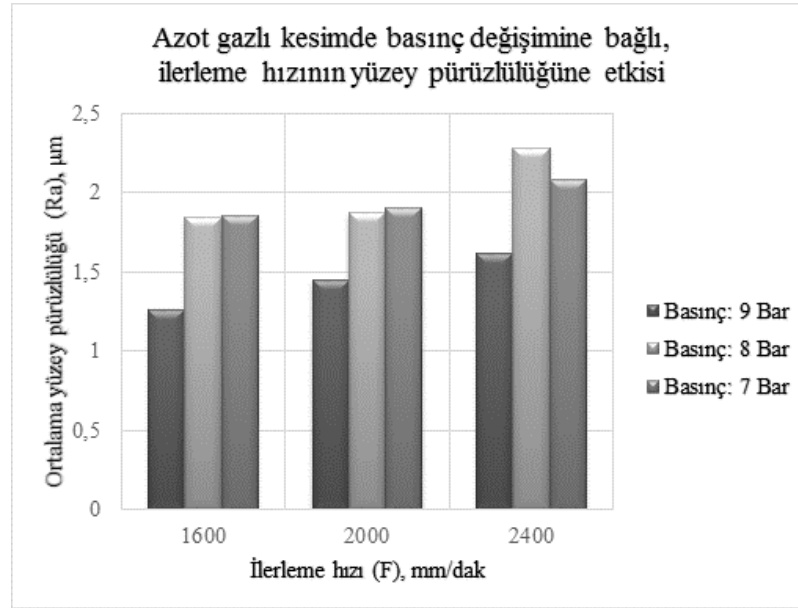
Şekil 8.6. Oksijen gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

Şekil 8.6'da yardımcı gaz olarak seçilen oksijen 8 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmektedir. Oksijen gazı ile kesimde gaz basıncının ilerleme hızına kıyasla daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.6'da azot gazlı kesimde basınç değerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin belirlendiği deney şablonu görülmektedir. Şekil 8.7'de deney sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini gösteren grafik yer almaktadır.

Çizelge 8.6. Azot gazlı kesimde basınç ve ilerleme hızının değişimine bağlı yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları.

Gaz	Güç ( W )	Focus (mm)	İlerleme (mm/dak)	Basınç (Bar)	Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )
Azot	1700	0	1600	9	1,261
Azot	1700	0	2000	9	1,449
Azot	1700	0	2400	9	1,616
Azot	1700	0	1600	8	1,843
Azot	1700	0	2000	8	1,871
Azot	1700	0	2400	8	2,283
Azot	1700	0	1600	7	1,859
Azot	1700	0	2000	7	1,907
Azot	1700	0	2400	7	2,079



Şekil 8.7. Azot gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.

Şekil 8.7'de yardımcı gaz olarak seçilen azot 9 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artış eğilimindedir. Diğer gazlara kıyasla gaz basıncının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azot gazlı kesim için iyileştiği tespit edilmiştir.

Ayrıca yüzey pürüzlülüğü üzerinde, gaz basıncının ilerleme hızına kıyasla daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında AISI 304 kalite 3 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik sacın CO<sub>2</sub> lazerle kesilmesinde en ideal kesme parametreleri aşağıdaki gibi olması gerektiği tespit edilmiştir. Bunlar;

- Güç: 1700 W
- Focus mesafesi: 0 mm
- Yardımcı gaz: Azot
- Yardımcı gaz basıncı: 9 bar
- İlerleme hızı: 1600 mm/dak

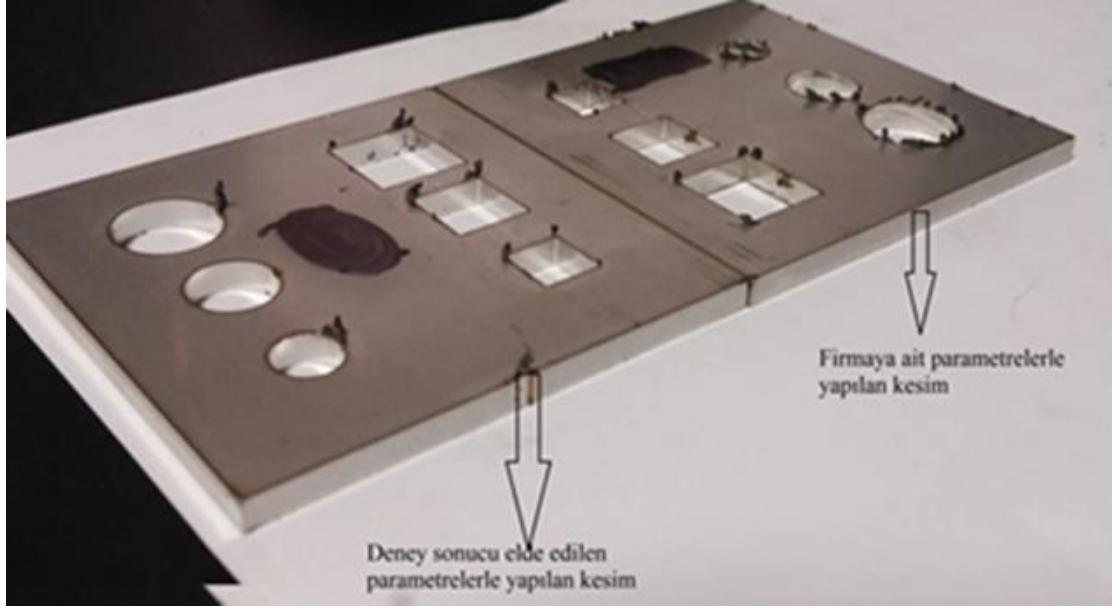
şeklindedir.

İdeal kesme parametreleri, deneylerin gerçekleştirildiği işletmede kullanılan parametrelerle enerji tüketimi, işçilik, zaman girdiler bazında kıyaslandığında aşağıdaki önemli sonuçlar tespit edilmiştir. Yapılan karşılaştırma deneylerine ait kesme parametreleri Çizelge 8.8’de ve kesme işlemi sonrası iş parçalarına ait görsel Şekil 8.8’de sunulmuştur.

Çizelge 8.7. Yapılan karşılaştırma deneylerine ait parametreler

	<b>Gaz</b>	<b>Güç ( W )</b>	<b>Focus (mm)</b>	<b>İlerleme (mm/dak)</b>	<b>Basıncı (Bar)</b>
Telmek AŞ. Kesim Parametreleri	Azot	2500	-2	2500	10
Deney Sonucu Bulunan Parametreler	Azot	1700	0	1600	9

Enerji hesaplamaları yapıldığında 8,9 kW/sa’lik bir tasarrufun söz konusu olduğu çapak oluşumunun daha az olduğu bunda kesim sonrası çapak temizleme süresini uzattığı, buna karşın kesim süresinde yarı yarıya bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8.8. Karşılaştırmaya yönelik optimum kesme parametreleri ve işletmenin kullandığı parametrelerle gerçekleştirilen deneye ait parça görüntüsü.

Enerji hesaplamaları yapıldığında 8,9 kW'tık bir tasarrufun söz konusu olduğu çapak oluşumunun daha az olduğu bunda kesim sonrası çapak temizleme süresini uzattığı, buna karşın kesim süresinde yarı yarıya bir artış olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen deney sonuçları literatürde yer alan deney sonuçları ile kıyaslandığında:

Yılbaş, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve lazer puls frekansının lazer ile kesmede en önemli parametreler olduğunu belirlemiş, ek olarak malzeme kalınlığının da kesme kalitesini etkilediğini, birinci derece etkileşimlerinin sonuçlarından ortaya çıkarmıştır [10].

Çalışmamızda ise kesme hızını parametresinin tek başına değil diğer parametrelerle ilişkili olduğunu doğru parametrelerle seçildiğinde maliyetleri ve diğer giderler üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Yardımcı gaz faktörünün ise doğru malzeme ile ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır. Örneğin paslanmaz bir malzeme hava veya oksijenle kesildiğinde yüzey kalitesi, çapak oluşumu kesme aralığı genişliğinin artması ve hatta bazı denemelerde malzemenin kesilememesi gibi sonuçlarla karşılaşılmıştır.

Nagaraja ise çalışmasında lazer kesme esnasında oluşan maliyetlerin sebeplerini araştırdığı çalışmasında lazer parametrelerinden olan yardımcı gaz, güç, malzeme kalınlığının ve diğer etmenlerin doğru tayin edilmesinin işletmeleri gerçek zamanlı üretim için, kayıpların azaltılmasında önemli bir yeri olduğunu hesaplamalarla ortaya koymuştur [13].

Yapılan tüm deneylerde Nagaraja ile ortak kanaatler sahip olduğu işletmelerin göz önünde bulundurmadığı bu parametrelerin işletmeler için çok ama çok önemli olduğu farkındalığının ortaya çıkarılması için çalışmaların artırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Rajaram, ve arkadaşları yapıkları incelemeler ile birlikte lazer gücünün kesme aralığında önemli bir etkisi olduğu halde kesme hızının daha az etkisi olduğunu gözlemişlerdir. Lazer gücünü azaltıp, kesme hızı arttırıldığında genelde kesme aralığının ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) azaldığını görmüşlerdir. Düşük güç düzeylerinde, kesme hızını arttırmak kesme aralığının ve ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) çok az seviyelere düşmesine sebep olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Yüksek güç seviyelerinde ise kesme hızının artması kesme aralığında daha büyük azalmalara neden olurken, ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) küçük artmalara neden olmuştur. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne ve oyuk oluşumunda önemli etkisi olduğunu görmüş, hız arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığını belirlemişlerdir [15].

Rajaram ve arkadaşlarının da bulduğu gibi yapılan deneylerde en iyi yüzey pürüzlülüğünün düşük güç değerinde olduğunu bununla birlikte focus mesafesi, yardımcı gazın doğru tayini ve hız değerinin optimum olarak seçilmesinin kesme kalitesini, çapak oluşumunu etkilediği sonucuna varılmıştır. Genel olarak vardığımız kanı şudur ki hızlı kesme veya fazla güç uygulama malzemeyi bozmakta veya kesmemekte olduğudur.

Ghany ve Newishy, 1,2 mm östenitik paslanmaz çelik kullanılarak yapıkları çalışmada kesme hızının, gücün, focusun, frekansın kesme üzerindeki etkilerini araştırarak çapaksız kesme için parametreler belirlemişlerdir, deneyler sonucu elde

edilen parametreler şöyledir. Frekans = 200–250 Hz, Duty=% 40, Güç = 880-1100W, Hız= 600–800 mm/dak , Odak mesafesi= -1mm, -0,5mm, Yardımcı gaz olarak azot ve Basınç= 9–11 bar olarak belirlemişlerdir [19].

Görülüyor ki en ideal yardımcı gazın azot olduğu frekansın artışının kesme hızının azalmasına sebebiyet verdiği ve bununla birlikte kesme aralığının, yüzey pürüzlülüğü kalitesinde artışlarının uyguladığımız deneylerde de gözlemlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda güç ile hızın arasında yüzdelik bir oranın olduğu hesaplanıp standartlaştırma işlemi çalışmaları yapılması önerimizdir.

Öner yaptığı çalışmada, kesim işlemleri karbondioksit lazer tezgâhında gerçekleştirmiştir. İşleme parametreleri olarak; 1 mm, 2 mm, 3 mm ve 4 mm iş parçası kalınlığı; 1000 W, 1200 W, 1400 W ve 1600 W lazer gücü; 200 mm/dak , 250 mm/dak, 300 mm/dak ve 350 mm/dak , lazer kesme hızı; 100 Hz, 500 Hz, 1000 Hz ve 1500 Hz lazer puls frekansı seçmiştir. Duty % 100, Basınç 10 kg/cm<sup>2</sup>, Odak - 2, Kafa 7,5", nozul çapı 1,5 mm olarak sabit tutmuştur. Yardımcı gaz olarak azot kullanmıştır. Kesme işleminden sonra optik mikroskopta elde edilen görüntülerden kesme aralığı ölçümü, oyuk oluşumları ve ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü ölçümü yapılarak işleme parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkisi incelemiştir. Farklı parametrelerde yapılan lazer kesimleri sonucu yüksek güç ve yüksek hızlarda daha düzgün yüzeyler elde etmiştir. Kesme hızının (ilerleme) artmasıyla, kesme aralığının azaldığı görülmüştür. Kesilen malzemedeki kalınlık artışı kesme aralığını arttırmıştır [32].

Lazer tezgâhında kesme işleminde seçilen parametreler, yaptığımız deneylerde ve araştırmalarda önemini bir kez daha ortaya koymuştur. Aralarındaki ilişkiler araştırılmaya hala muhtaçtır, üretim sektöründe önemini gittikçe arttıran bu teknoloji için doğru parametre seçimi yönünde yapılacak araştırmalar işletmeler ve teknoloji üreticileri için ışık tutacağına inanılmaktadır. Bizlerde çalışmalarımızda gördük ki yüksek güç, yüksek hız, yüksek frekans, yüksek gaz basıncı iyi kesme demek değildir. Bazen iyi sonuçlar verildiği düşünülse de işletmeler başka yönlerde kayıplara sebebiyet vermektedir. Bu yöndeki tüketilen enerji için bizlerin elde ettiği

sonuçları işletmenin kullandığı sonuçlarla karşılaştırılmış ve bu kanıya varılmıştır. Bununla ilgili çalışmaya aşağıda değinilecektir.



## BÖLÜM 9

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde enerji tasarrufunun önemi gittikçe artmaktadır, azalan yer altı zenginlikleri, küresel ısınma gibi etkenler enerji tasarrufunu devletlerin değişmez politikaları haline getirmektedir. Bütün bunlar söz konusu iken sanayide önemli bir yere sahip olan lazer tezgâhlarının yanlış kullanımlar sonucu fazla miktarda enerji sarfiyatı, ek işçilikler, kalitede azalmalar meydana gelmektedir.

Deneysel ağırlıklı bu tez çalışmasında CO<sub>2</sub> Lazer kesim tezgâhlarında, AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin kesilmesi ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bunlar;

- Kesmeye yardımcı gazların yüzey kalitesi üzerinde etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. AISI 304 kalite paslanmaz çelikler için en ideal kesmeye yardımcı gazın Azot gazı olduğu tespit edilmiştir.
- Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin var olduğu yapılan deneylerde gözlenmiştir. Malzeme cinsine bağlı en ideal kesme gücünün belirlenmesi, hem maliyet (enerji tüketimi, işçilik, vd.) hem de yüzey pürüzlülüğü açısından önem taşımaktadır. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için en ideal kesme gücünün 1700 W olduğu tespit edilmiştir.
- Yüzey kalitesi üzerinde focus mesafesinin etkili olduğu ve iş parçası malzemesine uygun en ideal focus mesafesinin belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için 1700 W güç değerinde, azot gazı ile kesimde en ideal focus mesafesinin 0 mm olduğu bulunmuştur.
- İlerleme hızının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği tespit edilmiştir. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için en ideal ilerleme hızının 1600 mm/dak olduğu tespit edilmiştir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalara aşağıdaki ner tavsiye edilmektedir. Bunlar;

- Benzer çalışmanın diğer iş parçası malzemeleri içinde yapılması literatür açısından önemlidir.
- Benzer alışmalar kerf boşluğu açısından da değerlendirilebilir.
- Kesilen bölgenin ısı tesiri ile termodinamik açıdan incelenmesi önerilir.
- Kesme sonrası ikincil işlemleri (apak alma, görsellik, vd.) azaltmaya yönelik deneyler tasarlanabilir.

## KAYNAKLAR

1. Kaluç E. “Lazer ışını ile kaynak ve kesme diğer kaynak yöntemleri”, **Kocaeli Üniversitesi Mühendisliği Bölümü**, İstanbul, 189-191 (1993).
2. Metiner H., “Lazerin çalışma prensipleri”, **Aselsan**, Ankara, 1-3, 4-5 (1995).
3. Tanrıverdi M. A., “Çelik Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde Kesme Bölgesinin Yapı ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 15, 10-14 (1995).
4. Ray A. K., “Laser Machining and its thermal effects on silicon nitride and steel”, Doctor of Philosophy, **Iowa State University**, 1-21, 121 (1995).
5. Anık, S., Öğür, A., Vural M., “Termik Kesme Teknolojisi”, **Gedik Eğitim Vakfı**, İstanbul, 112-152 (1996).
6. Temiz M., “ GaAs-Tabanlı Fiber Glas ve Lazerlerde Kılavuzlanmış Elektromanyetik Alan Modlarının Özelliklerinin İncelenmesi ”, **Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Denizli, Cilt 5:1147-1148 (1997).
7. Oral C., Kumruoğlu C. L., “Lazer İle Kesimin, Malzemelere Termal Etkisi” Orijinal alıntı Alternative Methods for Precision Sheet Metal Fabricating Conference, June 1996, **San Jose, CA** by Leonard Migliore (1997).
8. Ready J. F., “Industrial Applications of Lasers (Second Edition)” **Elsevier**, 247-271(1997).
9. Çelik S., “Lazerler, tıpta ve özellikle göz tedavisindeki uygulamaları” Proje-1, **Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü**, İstanbul, 4: 16-22 (1998).
10. Yılbaş B. S., “Study of parameters for CO<sub>2</sub> laser cutting process”, **Materials and Manufacturing Processes**, 13 (4): 517-536 (1998).
11. Acer H., “Lazer sistemleri” Yüksek Lisans Tezi, **Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**, Denizli, 1-3(1998).

12. Karaören K., “Lazer İle Kesim Parametrelerinin Tespiti” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 11 (1999).
13. Nagaraja D., “Laser Cutting Machine Justification of initial costs”, *Mater Sci (Engineering Technology)*, 1, 53-68 (2001).
14. Güven O., Ünal S., “Lazer Kesme”, Araştırma Yazısı, *Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Mersin, 1-2 (2002).
15. Rajaram J. S., Cheraghi H. S., “CO2 laser cut quality of 4130 steel” Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Wichita State University, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 351–358.
16. Kenar N., “Lazer Plazma Ortamlarından Yayılan X-Işını Rezonans Çizgilerinin Modellenmesi ve Uygulama Alanlarının Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 83-86 (2004).
17. ER İ., “Karbondioksit (CO2) Lazerle Fiber Optik Yüzeylerinin Parlatılması ve Verim Hesapları”, Yüksek Lisans Tezi Fizik *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-32 (2005).
18. Uslan İ., “CO2 laser cutting kerfs width variation during cutting”, *J. Engineering Manufacture* ,219: 571-577 (2005).
19. Ghany K. A., Newishy M., “Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser”, *Journal of Materials Processing Technology*, 168:438–447(2005).
20. Ion J. C., “Laser Processing of Engineering Materials, Principles, Procedure and Industrial Application”, *Elsevier*, 347-360 (2005).
21. Özel M., “Lazer Kesim Teknolojisi ve Endüstrideki Uygulamaları”, Araştırma Projesi, *Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Manisa, 13-18 (2005).
22. Karataş C., Keleş Ö., Uslan İ., Usta Y., “Laser cutting of steel sheets: Influence of work piece thickness and beam waist position on kerfs size and strain formation” *Journal of Materials Processing Technology*, 172:22– 29 (2006).
23. Ertek C., “Plazma ortamında iyon aşılannmış AISI 304 ve 316 L paslanmaz çeliklerin korozyon davranışlarının incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul,2-16 (2006).
24. Taşdemir V., “AISI AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğine ısı işlemin etkisi” Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 6-20 (2006).

25. Alıcı F., “Lazerle Kaplama Kesimi ve Ağaç Kakmacılığı Üzerine Bir Araştırma” Yüksek Lisans Tezi *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara 19-133 (2006).
26. Kujanpää 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).
27. Mungan C., “Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları” Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 32- 37 (2006).
28. Çelen S., “Paslanmaz Çeliklerin Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Bağlantının Dayanım ve Korozyon Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 34-41 (2006).
29. Akman E. “Ti6Al4V Titanyum Alaşımlarının Atımlı Nd:YAG Lazeri Kullanılarak Kaynak Edilmesi ve Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi” *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* 3-22 (2006).
30. Erdoğan Ş., “Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin Deneysel Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 37-38 (2007).
31. Dubey A.K., Yadava V., “Laser beam machining” *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 11-51 (2007).
32. Öner U., “Lazerle kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesine üzerindeki etkisinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 22-43 (2007).
33. Kamaruzaman S. B. A., “Carbon Dioxide (CO2) Laser Cut Quality Of Acrylic”, *Faculty of Mechanical Engineering*, University Malaysia Pahang, 12-13 (2008).
34. Kasman, Ş., “Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deneysel Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi”, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük (2009)
35. Goeke A., Emmelmann, C., “Influence of Laser Cutting Parameters on CFRP Part Quality”, *Physics Procedia* 5 253–258 (2010)
36. Kasman Ş., “Lazerle Derin Oyma Tekniğinde EN 7075 Alüminyum Alaşımı için İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* Cilt: 8, No: 2, 2011 (41-54).

37. Pandey K. A., Dubey K. A., “Intelligent Modeling of Laser Cutting of Thin Sheet”, *International Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 1, No. 2, (June 2011).
38. Patel J. M., Patel D. M., “ Parametric investigation in CO2 Laser Cutting Quality of Hardox-400 Materials ”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5979-5984 Vol. 3 No. 7 (July 2011).
39. Kasman, Ş., “AISI 304 Paslanmaz Çelik ve EN 5754 Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Fiber Lazer ile İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Tespiti İçin İstatistiksel Bir Çalışma”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi* Cilt: 8, No: 2, 27-36, (2011)
40. Akkurt A., Şık A., Ovalı İ., “AA2024 Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* Cilt 18, Sayı 1, , Sayfa 37-45, (2012)
41. Madiç J. M., Radovanoviç R. M., “ Analysis of The Heat Affected Zone In CO2 Laser Cutting of Stainless Steel” *Thermal Science*, , Vol. 16, Suppl. 2, S363-S373, (2012)
42. Cekic, A., Begic D., Kulenovic M., “Optimization of Process Parameters of Alloyed Steels Using CO2 Lasers” *International DAAAM Symposium*, Volume 23, No.1, ISSN 2304-1382, (2012).
43. Çatalçalı, R., “AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Kaplamalı ve Kaplamasız Kesici Takımlarla İşlenebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi *Makine Eğitimi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-19, (2010).
44. Zaied M., Bayraktar E., Katundi D., Boujelbene M., Miraoui I., “Effect of laser cutting parameters on surface quality of low carbon steel (S235) ”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 54 Iss. 1( 2012).
45. Eren E., “Yarı İletken Lazerlerin Optik Veriminin Fermi-Dirac Yaklaşımı Yöntemi ile İncelenmesi ”, Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 7-9, ( 2012).
46. Madiç J. M., Radovanoviç R. M., “Identification of the Robust Conditions for Minimization of the HAZ and Burr in CO2 Laser Cutting” *FME Transactions* 41, 130-137, (2013).
47. Petersen S. E. J., Jensen, D. H., “High quality laser cutting in aluminium” *Mater Sci*, Manufacturing Technology at Aalborg University, 13-26 (2013).
48. Çavdar K., T. Tanrısever , “Farklı malzemelerin lazerle kesilmesi” *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 18:81-93 (2013).

49. Özdağoğlu A. “Üretim İşletmelerinde Lazer Kesme Makinelerinin Promethee Yöntemi ile Karşılaştırılması” *Uluslararası Yönetim İktisat ve İşletme Dergisi*, Cilt 9, Sayı 19, 306-316, (2013).
50. Durkan Z., Motorcu A. R., GüllüŞırnak A. , “AISI AISI 304 çeliğini farklı geometrilerde lazerle kesmede parametrelerin boyutsal doğruluk üzerinde etkilerinin modellenmesi ” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 29:513-514 (2014).
51. Bıçakçı B., Durkan Z., “Lazerle kesmenin deneysel analizi ve yapay sinir ağları yöntemi ile modellenmesi ” *EÜFBED - Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 7-1: 1-18(2014).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Murat TUNÇ, 1983 yılında İzmir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini İzmir’de tamamladı. 2004 yılında Gazi Üniversitesi Kalıpcılık öğretmenliği bölümünde öğrenime başlayıp 2008 yılında mezun oldu. 2008 yılında Arçelik AŞ’de ARGE bölümünde göreve başladı daha sonra 2011 yılında Telmek AŞ’de ARGE biriminde görevine başlamış ve 2014 yılında ARGE sorumlusu olarak halen görevine devam etmektedir. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres Kültür Mah. Ataç–2 Sk. Baytın Apt. No:69/1  
Kızılay Çankaya/ ANKARA

Tel : (532) 680 3897

E-posta : ar602176@gmail.com