

**PASLANMAZ ÇELİĞİN FİBER LAZERLE  
KESİLMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN  
OPTİMİZASYONU**

**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Hüseyin UZUN**

**PASLANMAZ ÇELİĞİN FİBER LAZERLE KESİLMESİNDE İŞLEME  
PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**Hüseyin UZUN**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Haziran 2019**

Hüseyin UZUN tarafından hazırlanan “PASLANMAZ ÇELİĞİN FİBER LAZERLE KESİLMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU” başlıklı onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa GÜNAY

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/06/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

Başkan: Doç. Dr. Turgay KIVAK (DÜ)

Üye: Prof. Dr. Mustafa GÜNAY (KBÜ)

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Nafiz Yaşar (KBÜ)

İmzası

...../...../2019

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

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.



*“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.”*

Hüseyin UZUN

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **PASLANMAZ ÇELİĞİN FİBER LAZERLE KESİLMESİNDE İŞLEME PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU**

**Hüseyin UZUN**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**Haziran 2019, 57 Sayfa**

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin fiber lazerle kesilmesinde işleme parametrelerinin (odak noktası, basınç ve ilerleme hızı) yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve delik kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda, 5 mm kalınlığında paslanmaz çelik malzemenin, üç farklı odak noktası (-3, -4 ve -5 mm), basınç (12, 16 ve 18 bar) ve ilerleme hızı (1200, 1600 ve 2000 mm/dak) kullanılarak delinebilirliği değerlendirilmiştir. İşleme parametrelerinin çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri varyans analizi (ANOVA) ile incelenmiştir. Son olarak, Taguchi optimizasyon yöntemine göre işleme parametreleri optimize edilmiştir. Ferritik paslanmaz çeliğin fiber lazer ile delinmesinde, basıncın yükselmesiyle Ra değerlerinde bir azalma görülürken, ilerleme hızının artmasıyla birlikte Ra değerlerinin arttığı belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiye sahip parametre %51,70 PCR ile ilerleme hızıdır. Çapak yüksekliğine varyans analizi uygulandığında, ilerleme hızının %38,71 PCR ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Optimizasyon sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü -4 odak noktası, 18 bar basınç ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 1,25 µm olarak bulunmuştur. En küçük

apık ykseklėđi ise -5 odak noktası, 15 bar basınç ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 504  m olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** AISI 430, Fiber lazer, apık ykseklėđi, Yüzey pürüzlülüğü

**Bilim Kodu :** 914.3.028



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS IN CUTTING OF STAINLESS STEEL WITH FIBER LASER**

**Hüseyin UZUN**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mustafa GÜNAY**

**June 2019, 57 Pages**

In this study, the effect of machining parameters (focal point, pressure and feed rate) on surface roughness (Ra) and hole quality in fiber laser cutting of AISI 430 ferritic stainless steel was investigated. In this context, the drillability of stainless steel material of 5 mm thick was evaluated by using three different focal points (-3, -4 and -5 mm), pressure (12, 16 and 18 bar) and feed rate (1200, 1600 and 2000 mm/min). The effects of machining parameters on burr height and surface roughness were examined by the analysis of variance (ANOVA). Finally, the machining parameters were optimized according to the Taguchi optimization method. In the drilling of ferritic stainless steel with fiber laser, Ra values decreased with increasing pressure while Ra values increased with increasing feed rate. According to ANOVA results, the parameter which has the highest effect on surface roughness is feed rate with 51,70% PCR. When the analysis of variance was applied to the burr height, it was determined that the feed rate has the most effect with 38.71% PCR. As a result of the optimization, the lowest surface roughness was found to be 1.25  $\mu\text{m}$  with -4 focal points, 18 bar pressure and 1200 mm/min feed rate. The smallest burr height was obtained as 504  $\mu\text{m}$  with -5 focal points, 15 bar pressure and 1200 mm/min feed rate.

**Anahtar Sözcükler :** AISI 430, Fibre laser, Burr height, Surface roughness  
**Bilim Kodu :** 914.3.028





## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında her tŸrlŸ bilgi birikimini ve tecrŸbesini benimle paylaőan ve destek olan sayın hocam Prof. Dr. Mustafa GŸNAY'a teőekkŸrlerimi sunarım.

Çalıőmamda, tecrŸbelerinden faydalandığım Dr. Őğretim Őyesi Nafız YAŞAR, Dr. Öğr. Őyesi Mehmet Erdi KORKMAZ ve Öğr. Gör. Tolga MERAL'a çok teőekkŸr ederim.

Ayrıca, çalıőmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli aileme ve niőanlıma teőekkŸrŸ bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
BÖLÜM 3 .....	9
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	9
3.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN ÜSTÜNLÜĞÜ.....	10
3.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN SINIFLANDIRILMASI .....	11
3.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler .....	12
3.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	14
3.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler .....	16
3.2.4. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler .....	16
3.2.5. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler .....	17
3.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİ.....	18
BÖLÜM 4 .....	20
LAZER TEKNOLOJİSİ.....	20
4.1. LAZER TANIMI .....	20
4.2. LAZER ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	21
4.3. LAZER ÇEŞİTLERİ.....	24

4.3.1. Optik Pompalamalı Katı Lazerler.....	24
4.3.2. Sıvı Lazerler .....	25
4.4. ÇELİĞİN LAZER İLE İŞLENEBİLİRLİĞİ .....	25
4.4.1. Paslanmaz Çelik .....	26
4.5. LAZER İLE DELME İŞLEMİ .....	26
4.5.1. Lazer ile Delme Yöntemleri .....	27
4.6. LAZER KESME PARAMETRELERİ.....	30
4.6.1. Lazer Işın Parametreleri.....	30
4.6.2. Malzeme Parametreleri.....	31
4.6.3. İşleme Parametreleri.....	32
<b>BÖLÜM 5 .....</b>	<b>35</b>
<b>MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>35</b>
5.1. DENEY NUMUNESİ.....	35
5.2. DENEY DÜZENEĞİ.....	36
5.3. DENEY TASARIMI.....	37
5.4. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ ÖLÇÜMÜ .....	38
5.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ .....	39
<b>BÖLÜM 6 .....</b>	<b>41</b>
<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>41</b>
6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	42
6.2. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ .....	46
<b>BÖLÜM 7 .....</b>	<b>51</b>
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>51</b>
7.1. SONUÇLAR.....	51
7.2. ÖNERİLER.....	52
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>57</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Paslanmaz çelik türleri.....	12
Şekil 3.2. Paslanmaz çelik sınıflandırması.....	12
Şekil 3.3. Östenitik paslanmaz çeliğin özellikleri.....	13
Şekil 3.4. Ferritik paslanmaz çeliğin özellikleri.....	15
Şekil 3.5. Dupleks paslanmaz çeliğin özellikleri. ....	17
Şekil 3.6. Kesme işlemi.....	19
Şekil 4.1. Lazer kesim .....	20
Şekil 4.2. Lazer çalışma prensibi. ....	21
Şekil 4.3. Enerji seviye ve kendiliğinden geçiş diyagramı. ....	22
Şekil 4.4. Enerji seviye ve uyarılmış yayılma diyagramı .....	23
Şekil 4.5. Soğurma diyagramı .....	24
Şekil 4.6. Lazer kesme prosedürü .....	27
Şekil 4.7. Tek atım lazer metodu. ....	28
Şekil 4.8. Darbeli delme lazer metodu .....	28
Şekil 4.9. Kuyu delme burgusu .....	29
Şekil 4.10. Sarma kuyu delme burgusu metodu.....	29
Şekil 4.11. Lazer kesim parametreleri.....	30
Şekil 5.1. Lazer çalışma prensibi .....	36
Şekil 5 2. Örnek çapak yüksekliği .....	39
Şekil 6.1. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-5 odak). ....	43
Şekil 6.2. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-4 odak). ....	43
Şekil 6.3. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-3 odak). ....	43
Şekil 6.4. Ra için en uygun parametre seviyeleri.....	45
Şekil 6.5. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-5 odak). ....	47
Şekil 6.6. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-4 odak). ....	47
Şekil 6.7. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-4 odak). ....	47
Şekil 6.8. Çapak yüksekliği için en uygun parametre seviyeleri. ....	49

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 5.1. AISI 430 kimyasal özellik . . . . .	35
Çizelge 5.2. AISI 430 mekanik özellik . . . . .	35
Çizelge 5.3. Deney tasarımı . . . . .	38
Çizelge 5.4. Mikro kamera özellikleri . . . . .	39
Çizelge 5.5. Yüzey pürüzlülük cihaz özellikleri. . . . .	40
Çizelge 6.1. Deney sonuçları. . . . .	42
Çizelge 6.2. Ra için varyans analizi. . . . .	46
Çizelge 6.3. Çapak yüksekli için ANOVA sonuçları. . . . .	49

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Ra : Ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )

f : İlerleme hızı (mm/dak)

### KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute

SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

HB : Brinell Sertlik Değeri

LBM : Laser Beam Machining (Lazer Işını ile İşleme)

RSM : Response Surface Method (Yanıt Yüzey Metodu)

CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)

N : Azot

C : Karbon

CO : Karbonmonoksit

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüzde, endüstriyel uygulamalarda, teknolojinin hızlı gelişmesine bağlı olarak malzemelerin belirli hassasiyete sahip olarak kullanılabilir ürün hale getirilmesinde kullanılan yöntemlerde beklentiler artmaktadır. Bunun nedeni, kesme ve delme işlemlerinde istenen yüksek kesme hassasiyeti, karmaşık yapıları kesme ve delebilmek için, dik ve keskin kenarlara sahip yapılar, ısıdan etkilenme, düşük ölçeklerde et kalınlığı yükselen malzemeler gibi etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle sertlik değerleri yüksek olan temel ferritik paslanmaz çelik malzemelere olan ihtiyaçlar ve bu ihtiyaçlar doğrultusunda beklenen hassasiyet giderek artmaktadır. Ferritik paslanmaz çelikler yüksek krom içeren (%10,5 ile %30 arasında), molibden, titanyum vanadyum gibi karbür yapıcı ve ferritik yapıyı istikrarlı kılan alaşım elementlerini içeren bir paslanmaz çelik gurubudur. Genelde içerdikleri yüksek krom oranı, çok yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. Son zamanlarda alaşım elementlerine; özellikle nikel elementine ulaşımın zorlaşması dolayısıyla dayanıklılığı östenitik paslanmaz çeliklere yakın olan ferritik paslanmaz çeliklerin geliştirilmektedir. Bunların içerisinde en yaygın olanı ise AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin olduğu görülmektedir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı ferritik paslanmaz çelikler, özellikle otomotiv endüstrisinde, beyaz eşyalarda, dekoratif amaçlı yapılarda, yıkama makinelerinde, parlak yüzey istenen uygulamalarda, ev gereçlerinde, mutfak eşyalarında ve tarım makineleri endüstrisinde kullanımı yaygın olan malzemeler haline gelmektedir.

Kullanım alanlarının giderek artmasına rağmen AISI 430 ferritik paslanmaz çelik özellikle son ürün haline geliş kısmında işleme prosesleri açısından gelişme gösterememiştir. Karmaşık yapılarda kullanılmasından kaynaklı işleme proseslerinin zahmetli olması maliyetinin fazla olmasına neden olmaktadır.

Üretilen parçaların büyük bir kısmı son halini lazerle kesme veya delme yöntemleriyle almaktadır. Yaygın kullanım alanları bulmasına rağmen sertliğinin yüksek olması sebebiyle; et kalınlığı arttıkça işlenmesi güç malzemeler sınıfına girmektedir. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin düşük işlenebilirliğinin ana sebebi, karmaşık yapılarda artan kalınlığa bağlı olarak yüksek hassasiyetlerin içerisinde bulunan Karbon (C) elementinin kattığı düşük elastiklik modülüdür.

AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin son zamanlarda malzeme birim maliyetinin düşük olması, buna karşın mukavemet ve korozyon direncinin yüksek olması nedeni ile daha geniş alanlarda kullanılmaya başlanması; işleme hassasiyetinin yükseltilmesi açısından özellikle lazerle delme işlemlerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışmaların gerekliliği sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Deneysel ağırlıklı olan bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemenin fiber lazerle kesme işlemlerinde; odak noktası, gaz basıncı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ve delik kalitesi açısından değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür taramasında, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin işlenebilirliği üzerine fiber lazer ile kesme ve/veya delme işlemleri açısından yeterli bir çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışma ile AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin lazer ile yüksek verimlilikte delinebilirliği ile ilgili bilgi birikiminin kazandırılması hedeflenmiştir.



## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İleri mühendislik malzemelerinin kullanımının yaygınlaşmasına bağlı olarak karmaşık tasarım geometrileri ve düşük boyut performanslarına bağlı yüksek yüzey hassasiyetleri, geleneksel işleme metotlarının kullanımını sınırlandırmaktadır [1]. Lazerle işlemenin geleneksel metotlara (plazma, oksijen ile kesim, testere) kıyasla pek çok üstünlüğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. Temas etkeni bulunmadan malzemeleri işleme yeteneğine sahip olmakla birlikte kesme ve delme işlemlerinde kese zorluğu olan kırılğan, yumuşak veya sert, ince malzemelerin hızlı ve yüksek hassasiyete sahip şekilde kesilmesi olanağını sunmaktadır [2]. Lazer ile işleme termal bir süreçtir ve termal çalışmaya duyarlı malzemelerde termal etkiler çok sınırlı bir bölgede tutulabilmektedir [3]. Diğer avantajları ise minimum malzeme kaybı veren dar kesim izi (kerf), oldukça düz kesme kenarı, minimum metalürjik ve yüzeysel bozukluklar, yüksek kesme hızı, karmaşık kesimler için bilgisayar destekli nümerik kontrollü tezgahlara kolay entegrasyon edilebilmesidir [4,5]. Lazerle saç metal kesiminde, lazerler yüksek güç ve ışın kalitesi sundukları için bu alanda egemendirler [6]. Saç metal kesimi, endüstrideki lazer uygulamaları içerisinde en büyük paya sahip olmaktadır. İşlem temelde odaklanmış lazer ışını ile düzlem bir tabaka kesme işlemidir. Lazer ışınının malzeme üzerine mercekler yardımıyla odaklanması sonucunda, küçük ve hassas olarak konumlanmış bir bölgede ergitme ve buharlaştırma ile kesme gerçekleştirilmektedir [2]. Ayrıca, lazer ile delme işlemi; geleneksel delik delme işlemlerine göre hassas, hızlı, doğru ve ekonomik sonuçlar vermektedir. Lazer teknolojisinin son yıllarda gelişmesi; basınç, ışın, odak ve kesime etki eden diğer parametrelerin düzenlenerek ürün kalitesini yükseltmesi adına imkan sağlamaktadır. Deliklerin boyutsal doğruluğu ve kalitesi, bazı özel delik uygulamaları için çok önemli olmaktadır. Giriş ve çıkışta delinmiş deliklerin daireselliği ve konikliği lazer ile delme işleminde deliğin kalitesini etkileyen çok önemli özelliklerdir. Bu bağlamda, böylesine kullanışlı ve yaygın bir teknolojiyi en uygun şekilde kullanabilmek için, kesme işlemini etkileyen parametrelerin iyi bilinmesi ve bu parametrelere bağlı olarak kalitesi yüksek ürünlerin elde edilmesini sağlamak ve kesme parametrelerinin istenen ürün hassasiyetlerini geliştirilmesi amacı ile birçok çalışma yapılmıştır [7].

Rajesh vd., östenitik paslanmaz çelik malzemelerden oluşan 31 farklı deney yaparak kesme parametrelerinin delik kalitelerine olan etkilerini incelemişlerdir. Daha sonra modeller Yanıt Yüzey Metodu (RSM) kullanılarak tahminde bulunuldu ve yeterlilik açısından test edildi. RSM tarafından öngörülen modellerin deneyler ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle, modellerin evrimsel algoritmalar kullanılarak proses parametrelerinin optimizasyonu için de kullanılabilceği sonucuna ulaşılmaktadır [8].

Mert vd., yaptıkları çalışmada, kesme parametrelerinin CO<sub>2</sub> lazer makineleri kullanılarak AISI 304 paslanmaz çelik sacların kesme işlemi üzerindeki etkileri incelemiştir. Deneylerde, güç, hız, odak mesafesi, yardımcı gaz ve basınç gibi kesme parametreleri değiştirilmiş ve bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Kesilen numuneleri sabitlemek için özel bir fikstür kullanılmış ve lazer kesim yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerleri bir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Lazerle kesimdeki yüzey pürüzlülüğünün, artan basınç (azot yardımcı gaz kullanılarak), güç ve ilerleme hızı düşürülmesiyle azaldığı sonucuna varılmıştır. CO<sub>2</sub> lazer makineleri kullanılarak AISI 304 paslanmaz çelik sacları keserken, en iyi yüzey kalitesi açısından ideal parametreler, N<sub>2</sub> yardımcı gazla 1700 W güç, 9 bar gaz basıncı ve 1600 mm/dak ilerleme hızı olarak bulunmuştur [9].

Endüstriyel alanlarda, levhalar üzerinde lazer kullanarak elde edilebilecek mikro delikler oluşturmak, zorlayıcıdır. Lazer ile delme, tek patlatmalı delme, patlatmalı delme, helisel delme ve üçlü delme yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Patlatmalı delme yöntemi lazer sistemlerinde kullanılan yaygın bir yöntemdir. Pak vd., nikel bazlı süper alaşım Inconel 718'in lazer patlatmalı delme işleminin parametrelerini 1 mm kalınlıkta incelemiştir. Lazer kaynağı olarak 1070 nm dalga boyunda bir fiber lazer kullanılmıştır. Lazer delme işleminde; lazer darbe frekansı ve yardımcı gaz basıncı, değişken parametreler olarak kabul edilmiştir. Oksijen yardımcı gaz olarak kullanılmaktadır. Yapılan deneylerdeki deliklerin geometrik özelliklerini incelemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Delik geometrisi özellikleri (delik giriş ve çıkış çapları, delik girişinin daireselliği ve delik çıkış daireselliği ve delik konikliği) image yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Sonuçlar, lazer nabız frekansının giriş deliğinin çapı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Patlatma süresinin

arttırılması delik konikliğinde artışlara neden olmuştur. Lazer gücünü artırılarak, giriş ve çıkış deliği çapı artmakta ve delik konikliği yükselmektedir [10].

Wandera vd., 10 mm paslanmaz çelik levhada yüksek kesim kalitesi elde etmek için fiber lazer kesim parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Test edilen işleme parametreleri kesme hızını, odak pozisyonunu ve odak uzunluğunu içermektedir. Bu işleme parametrelerinin optimizasyonu, kesim yoğunluğunun iş parçasına girmesi için yeterli olmadığında, alt kesim kenarına istenmeyen cüruf yapışmasını ve hatta iş parçasının eksik bir şekilde kesme işlemi gerçekleştirmesi veya kesimde eriyik çıkmasını arttırmaktadır. Daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha düşük cüruf olmadan kesme kenarları, kesme hızını elde edilebilir maksimum değerden düşürerek, deney levhasının altında yer alan odak pozisyonu (sıfırın altında odak noktası) ile elde edilebileceği anlaşılmaktadır [11].

Yüksek güçlü fiber lazerler, yüksek güçlü CO<sub>2</sub> lazerlerin hakim olduğu bir alan olan kalın kesitli metal kesiminde yeni bir olasılık sunmaktadır. Wandera çalışmasında, yumuşak çeliğin oksijen destekli lazer kesimi ve paslanmaz çeliğin azot destekli lazer kesimi için kesme hızının bir fonksiyonu olarak lazer güç gereksiniminin toplu parametre formülizasyonunu sunmaktadır. Oksijen yardımcı gaz kullanarak 15 mm yumuşak çeliğin ve azot yardımcı gaz kullanarak 10 mm paslanmaz çeliğin 4 kW CO<sub>2</sub> ve 5 kW fiber lazer ile kesiminde hesaplanan lazer güç gereksinimleri karşılaştırılmaktadır. Fiber lazer ile belirli bir kesim hızında kesim için gereken lazer gücünün, CO<sub>2</sub> lazer kesimindeki harcanan güç gereksiniminden daha düşük olduğu, fiber lazer ışınının daha yüksek emilim gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Yüksek güçlü fiber lazer kullanılarak oksijenle desteklenmiş gazla yapılan yumuşak çelik lazerli kesimde işleme parametrelerinin kesim kalitesine etkileri sunulmuştur. Kesme işleminin kalitesini ve sonuçta elde edilen kesme işlemini etkileyen kritik işlem parametreleri, odak noktası, kesme hızı, oksijen basıncı ve meme çapı olarak bulunmuştur [12].

Paslanmaz çelik, yüksek erime noktası ve oluşan oksitlerin düşük viskozitesi nedeniyle oksiyakıt yöntemleriyle kesilmesi zor olan önemli bir mühendislik malzemesidir. Bu durumun getirdiği sebeple birlikte, lazerle kesilmesi uygun olmaktadır. Ghany, her biri

ayrı ayrı yardımcı gazlar olarak azot veya oksijen kullanarak 1,2 mm östenitik paslanmaz çelik levhalar için optimum lazer kesim parametrelerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Lazer kesim kalitesinin esas olarak lazer gücüne, frekansına, kesim hızına ve odaklama pozisyonuna bağlı olduğu gösterilmektedir. Uygulanan güç 210W, frekans 200–250 Hz, hız 1–1,5 m/dak, patlatmalı modda, netleme pozisyonu -0,5 ila -1 mm, azot basıncı 9-11 bar ve oksijen basıncı 2-4 bar'da optimum kesimi elde edilmiştir. Frekans ve kesme hızının artırılması kerf genişliği ve kesim yüzeyinin pürüzlülüğünü azaltırken, güç ve gaz basıncını arttırmak kerf genişliği ve pürüzlülüğünü artırdığı görülmektedir. Oksijenle kıyaslandığında, azot daha ekonomik ve yumuşak olmamasına rağmen daha küçük kerf ile daha parlak ve pürüzsüz bir kesim yüzeyi oluşturmaktadır [13].

Moradi ve Golchin, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak lazer ile delik delmeye etki eden parametrelerin (lazer frekansı, lazer gücü ve lazer odak noktası) etkilerini Inconel 718 malzemesi üzerinde araştırmışlardır. İstatistiksel analiz yapılarak parametrelerinin birbirleriyle doğrudan ilişkisi olduğu bulunmuştur. Parametrelerin her birinin artmasıyla, giriş ve çıkış deliği çapları, delik koniklik açısı ve çıkarılan kütle ağırlığının arttığını saptamışlardır. Ayrıca, sonlu elemanlar yönteminin kullanılabilir ve güvenilir olduğuna dikkat çekmişlerdir [14].

Wang vd., lazer ile delme işleminde delinen mikro deliklerinin kalitesi üzerinde lazer gücünün etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, meydana gelen deliğin giriş ve çıkış daireselliklerinin lazer gücünün artmasıyla arttığını belirtmişlerdir. Delinen deliklerin konikliği, lazer gücünün 60-110 W'a artmasıyla hızlı bir şekilde sabit bir değere yükseldiğini ve daha sonrasında ise lazer gücünün 170 W'dan büyük olduğunda hızla düştüğünü tespit etmişlerdir. Ek olarak, 400 ile 1200 µm çapındaki mikro deliklerin başarıyla üretildiğini söylemişlerdir [15].

Ozaki vd., yardımcı gaz kullanmadan östenit paslanmaz çelik malzemesinin lazer ile delme işlemini araştırmışlardır. Bu çalışmada östenitik paslanmaz çeliğin, 2 kW CO<sub>2</sub> lazer ile AGF lazerli kesim kullanılarak kesilme özellikleri incelenmiştir. Çeşitli lazer gücü ve kesme hızı kullanılarak kesme özellikleri üzerinde bu parametrelerin etkileri çalışılmıştır. Araştırmacılar, östenitik paslanmaz çeliğin, AGF lazer kesimi ile

cürufsuz olarak kesilebildiğini vurgulamışlardır. Lazer gücü 2.0 kW olduğunda, kesme hızının 100 mm/sn'ye kadar yükseltilebilir ve numune yüzeyindeki kerf genişliğinin ise 0.28 mm'ye kadar olabileceğini belirtmişlerdir [16].

Jarosz vd., 316L paslanmaz çelik malzemesinin delinmesinde kesme hızının yüzey kalitesi ve ısıdan etkilenen bölge (HAZ) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Her test numunesinin yüzey pürüzlülüğü, kesme derinliği boyunca birkaç yerde ölçülmüş ve kesilen yüzeylerin fotoğrafları, kamerayla donatılmış stereoskopik mikroskop kullanılarak alınmıştır. Kesme hızını düşmesiyle HAZ genişliği artmış ve belirli bir eşik değerinin altında kesilen yüzeylerin kalitesinin hasarlı olduğu anlaşılmıştır. Araştırmada en yüksek kesme hızının kullanılması ( $V= 16,5$  mm/s), iyi bir yüzey kalitesinin ve ısınmadan etkilenmeyen bölgenin oluşmasını sağlamıştır [17].

Chatterjee vd., lazer ile delme işleminde yüzey kalitesine etki eden ve delme sonucu delik kenarlarında meydana gelen lekeler üzerindeki parametrelerin etkilerini istatistiksel olarak incelemişlerdir. AISI 316L paslanmaz çelik malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen deneyler kapsamında basınç, lazer frekansı ve lazer gücü dikkate alınmıştır. İstatistiksel analiz (ANOVA) sonucunda lazer ile delme sonucu oluşan delik kenarlarında oluşan lekelerle etki eden en önemli parametrelerin basınç ve lazer frekansı olduğu bulunmuştur [18].

Satpute vd., 1,2 mm kalınlığında yumuşak çeliğin lazer ile delinmesinde işleme parametrelerinin delik giriş-çıkış dairesellikleri ve HAZ üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hem giriş hem çıkış daireselliklerinin lazer gücü ve gaz basıncından önemli ölçüde etkilendiğini bulmuşlardır. Hem giriş hem çıkış dairesellikleri lazer gücündeki artışla arttığını ve lazer gücü arttıkça konikliğin azaldığını saptamışlardır. Ayrıca HAZ'ın, güç artışıyla arttığını ancak kesme hızındaki artışla azaldığını tespit etmişlerdir [19].

Rajaram vd., 4130 çeliğine CO<sub>2</sub> lazer kesme sistemi uygulayarak ilerleme oranı ve lazer gücünün kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve HAZ üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, gücün kerf genişliği ve HAZ üzerinde en önemli etkiye sahip olduğunu bulurken, ikincil etkenin ilerleme oranı olduğunu belirtmişlerdir.

Diğer taraftan düşük ilerleme oranının iyi yüzey kalitesi oluşturduğu saptanmıştır. Ek olarak düşük gücün, düşük kerf genişliği ve HAZ'ın oluşumuna sebebiyet verdiğini söylemişlerdir [20].

Gadallah ve Abdu, AISI 316L paslanmaz çeliğin lazer ile delinmesinde kesme parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında ortalama kerf konikliği ve yüzey pürüzlülüğü için en uygun lazer gücü, gaz basıncı, lazer frekansı ve kesme hızı belirlenmiştir. Taguchi optimizasyonuna göre en iyi kerf kalitesi 150 W güç, 0,5 MPa basınç, 125 Hz lazer frekansı ve 40 cm/dak kesme hızında ortaya çıkarken, ortalama en iyi yüzey pürüzlülüğü içinse 150 W güç, 0,5 MPa basınç, 25 Hz. lazer frekansı ve 20 cm/dak kesme hızında bulunmuştur. Güç ve yardımcı gazın kerf kalitesinde önemli bir rol oynadığı vurgulanmıştır [21].

Chen vd., 3 mm kalınlığındaki yumuşak çeliğin lazer ile delinmesinde yardımcı gazların etkilerinin incelenmesi üzerine çalışmışlardır. Yüksek basınçlı oksijen kesimi ve yüksek basınçlı hava lazer kesimi düşük kaliteli kesim sağlamıştır. Araştırmacılar, 3 mm yumuşak çeliğin kesimi için 40-120 mm/sn kesme hızında 1,4-0,6 kW aralığında bir lazer gücüne sahip 10 bar'lık bir oksijen basıncında kabul edilebilir kalitede kesim bulunamadığını tespit etmişlerdir. Argon gazının 25 mm/sn kesme hızında ve 10 bar'lık basınçta düzgün bir kesim işlemi gerçekleştirdiğini saptamışlardır [22].

## BÖLÜM 3

### PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, yüksek mukavemet özelliği taşıyan ve korozyona karşı direnç amacıyla geliştirilen yüksek alaşımları bünyesinde arındıran, önemli ve geniş alana sahip olan bir mühendislik malzemesi sınıfıdır. Paslanmaz çelik ailesi, yaygın bir şekilde otomotiv ve gıda endüstrisi, sağlık uygulamaları, havacılık ve uzay sanayi alanlarında, ev eşyaları, dekoratif ürünler, tekstil sektörü, tarım endüstrisi yüksek sıcaklık uygulamaları ve mimari uygulamalar gibi birçok önemli endüstri alanında kullanılmaktadır. Endüstriyel alanlarda geniş kullanım alanına sahip olan ve önemli mühendislik malzemeleri sınıfında yer alan paslanmaz çelikler, demir esaslı alaşımlar sınıfında yer almaktadır. Bilindiği üzere çelik malzemelerin temeli Demir-Karbon alaşımına dayanmaktadır. Bu alaşımların içerisine eklenen zengin krom oranı ile paslanmaya karşı dayanıklı hale getirilen ve Fe-Cr, Fe-Cr-C ve Fe-Cr-Ni sistemlerine dayanan yüksek alaşımlı çelik grubu olan paslanmaz çelik sınıfı geliştirilmektedir. Çeliğin normal şartlar altında korozyona karşı dayanıklı olabilmesi Krom (Cr) elementinin eklenmesi ile yeterli olmaktadır. Ancak ortam koşullarının daha zorlu hale gelmesi durumunda çeliğin dayanıklılığını artırmak amacı ile Nikel (Ni), Molibden (Mo) vb. birçok kimyasal elementin eklenmesi gerekmektedir. Özet olarak bir çeliğin paslanmaz hale gelmesi ve korozyona karşı direnç göstermesi; çelik içerisindeki alaşımlar ve bu alaşımların karışım oranı ile belirlenmektedir. Diğer taraftan, Karbon (C) ve Kükürt (S) gibi elementlerin çelik üzerinde oranlarının artırılması durumunda ise paslanmazlık ve korozyon direncinin düşmesine sebep olmaktadır [23,24].

Krom (Cr) kimyasal yapısı gereği Oksijen (O) ile tepkime gösteren bir elementtir. Paslanmaz Çeliklerin içeriğinde bulunan Krom (Cr) elementinin, Oksijen (O) ile teması durumunda Çeliğin yüzeyinde moleküler düzeyde bir Krom-Oksit film tabakası oluşmaktadır. Bu tabakanın kalınlığı 130 Angstrom ( $130 \text{ \AA} = 1,3 \times 10^{-2}$ ) değerine kadar ulaşabilmektedir. Krom-Oksit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) katmanı pasif, kuvvetli ve kendini yenileyebilen bir yapıya sahiptir. Bu katmanın pasif yapıya sahip olma durumu Oksijen (O) dışında herhangi bir element ile tepkimeye girmemesi olarak değerlendirilmektedir. Kuvvetli yapı, çeliğin yüzeyine yapışma işleminin sağlam

olması anlamına gelmektedir. Yenilenebilir özelliği ise;  $Cr_2O_3$ , yüzeyin aşınması veya yüzeyden zorlayarak çıkarılması durumunda tekrar havada bulunan Oksijen (O) ile yeni bir katman oluşturarak paslanmaz özelliğinin korunması yeniden sağlamaktadır. Bu durum, paslanmaz çeliğin kendini onarabilmesi (Self-Passivation) olarak adlandırılmaktadır. Paslanmaz Çeliğin yüzeyinde; krom yönünden zengin, ince fakat yoğun bir tabaka olan  $Cr_2O_3$  kaplı yüzey filmi korozyona karşı yüksek dayanım sağlamakta ve oksidasyon işleminin derin yüzeylere ilerlemesine engel olmaktadır [24,25].

### 3.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN ÜSTÜNLÜĞÜ

Standart yumuşak karbon çeliğine kıyasla paslanmaz çeliklerin daha üstün özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Paslanmaz Çelikler geniş bir özellik yelpazesine sahip olması ile genel olarak, yumuşak çeliklerle karşılaştırıldığında, paslanmaz çeliklerin avantajları;

**Yüksek Korozyon Direnci;** Paslanmaz çeliklerin korozyon direncinin iyi olmasının nedeni ince, görünmez bir yüzey filmi olan  $Cr_2O_3$  katmanının olmasıdır. Bu katman, çeliği agresif bir ortamda saldırıdan koruyan bir tabakadır. Bir çeliğe Cr ilave edildiğinde bu tabakanın oluşumunun hızlı bir şekilde gerçekleşmesi korozyona karşı direnci güçlendirmektedir. Kompakt ve pasif bir  $Cr_2O_3$  katmanı elde etmek için, en az %10,5'lik bir Cr içeriği gerekmektedir. Pasiflik derecesi, krom içeriği %17'ye kadar yükselirken oldukça hızlı bir şekilde artmaktadır. Birçok paslanmaz çeliğin %17-18 oranında krom içermesinin nedeni budur. Bunların aksine, normal yumuşak karbonlu çelikler boya veya galvanizleme gibi diğer kaplamalar tarafından korozyondan korunabilmektedir. Yüzeyin herhangi bir aşınmaya maruz kalması durumunda altta yatan çeliğin ortaya çıkmasına, buna bağlı olarak paslanmalar oluşabilmektedir. Paslanmaz çelikler ise krom içeriği sebebiyle sürekli kendini yenileyen  $Cr_2O_3$  tabakası sayesinde yüksek korozyon direnci sağlamaktadır [26,24].

**Yüksek Sıcaklığa Dayanımı:** Paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemetini korumaya devam etmektedir. Bu özellik, paslanmaz çeliğin içerdiği elementler ile sağlanmaktadır. Paslanmaz çeliklerin yüksek krom içeriği, aynı



zamanda yüksek sıcaklıklardaki ölçeklendirmelerde direnmeye de yardımcı olmaktadır [26,24].

**İmalat Kolaylığı:** Paslanmaz çelikler, imalatın her alanında (Kaynak, kesme, şekillendirme işlemleri, talaşlı imalat) kolaylıkla işlenebilmektedir [26,24].

**Görünüm:** Paslanmaz çelikler diğer metallere kıyasla daha parlak görünüme sahiptir. Ayrıca paslanmazlık özelliği sayesinde kolayca temizlenebilmektedir [27,24].

**Düşük Bakım ve Uzun Ömür:** Kolayca temizlenebilme özelliği sayesinde bakım işlemleri kolay ve kısa sürede yapılabilmektedir. Bu özelliğine bağlı olarak diğer metallere kıyasladığımızda ömrü uzun olmaktadır. Paslanmaz Çeliklerin bütün ömür uzunluğu dikkate alındığında ise diğer metallere kıyasla ekonomik olduğu anlaşılmaktadır [27,24].

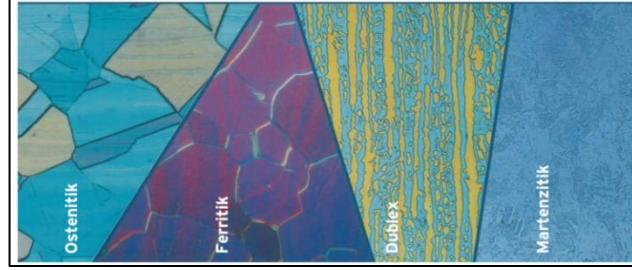
### 3.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimlerindeki oranlar değiştirilerek farklı özellikte alaşımlar oluşturulmaktadır. Krom miktarı yükseltilebilmekle birlikte nikel veya molibden elementlerinden de eklenerek korozyon dayanımı artan farklı sınıfta paslanmaz çelikler geliştirilebilmektedir. Bunların dışında Titanyum (Ti), Alüminyum (Al), Silisyum (Si), Azot (N) ve Kükürt (S) gibi elementler de alaşımlara eklenerek farklı kimyasal bileşimler oluşturulabilmektedir. Oluşturulan kimyasal bileşim değerlerine bakarak tasarımcılar ve imalatçılar uygun malzemeyi seçebilmektedir. Paslanmaz çeliklerde, iç yapının belirlenmesi için önemli olan Cr ve Ni elementleri ana grupları belirlemektedir. Diğer elementler ise bu grupları kendi içerisinde sınıflara ayırmaktadır [28].

Paslanmaz çelikler beş ana grupta toplanmaktadır.

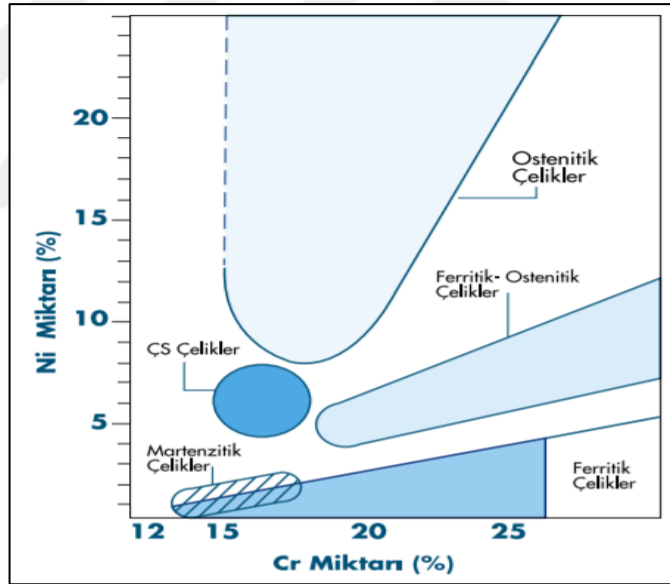
- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik Paslanmaz Çelikler
- Martenzitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler
- Çökelme Sertleştirilmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması alışılmışın dışında olup, çelikten alınan taneciklerin ince tanecikli bölme işlemine dayandırılarak metalurjik ve ince yapı kimyasallara dayandırılması esasına dayanmaktadır [28].



Şekil 3.1. Paslanmaz çelik türleri [28].

Paslanmaz çeliklerin farklı grupları Şekil 3.1 ve 3.2’de görülmektedir.

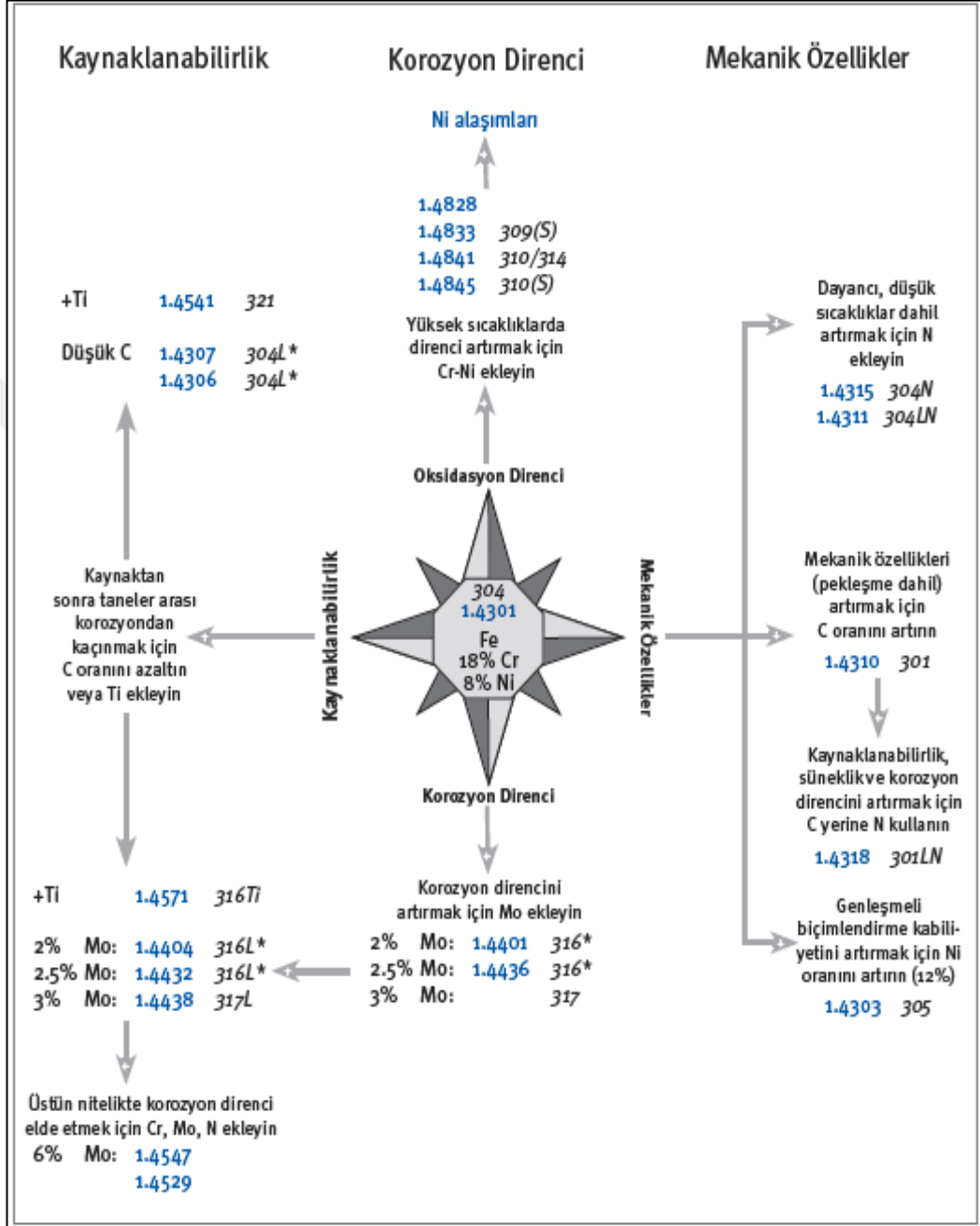


Şekil 3.2. Paslanmaz çelik sınıflandırması [28].

### 3.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikleri yapısında korozyona direnç gösteren krom ve östenitik bir yapı oluşturmak suretiyle de nikel bulunan ve oda sıcaklığında manyetik etkisi olmayan, paslanmaz çelik türü olarak tanımlanmaktadır. AISI ve/veya DIN çeşitlerine göre kısa ifadelerle tanımlanmakta olup, Cr-Ni oranına göre paslanmaz çelik açısından

farklılık göstermektedir [29]. Östenitik paslanmaz çeliğin bazı önemli özellikleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Östenitik paslanmaz çeliğin özellikleri [30].

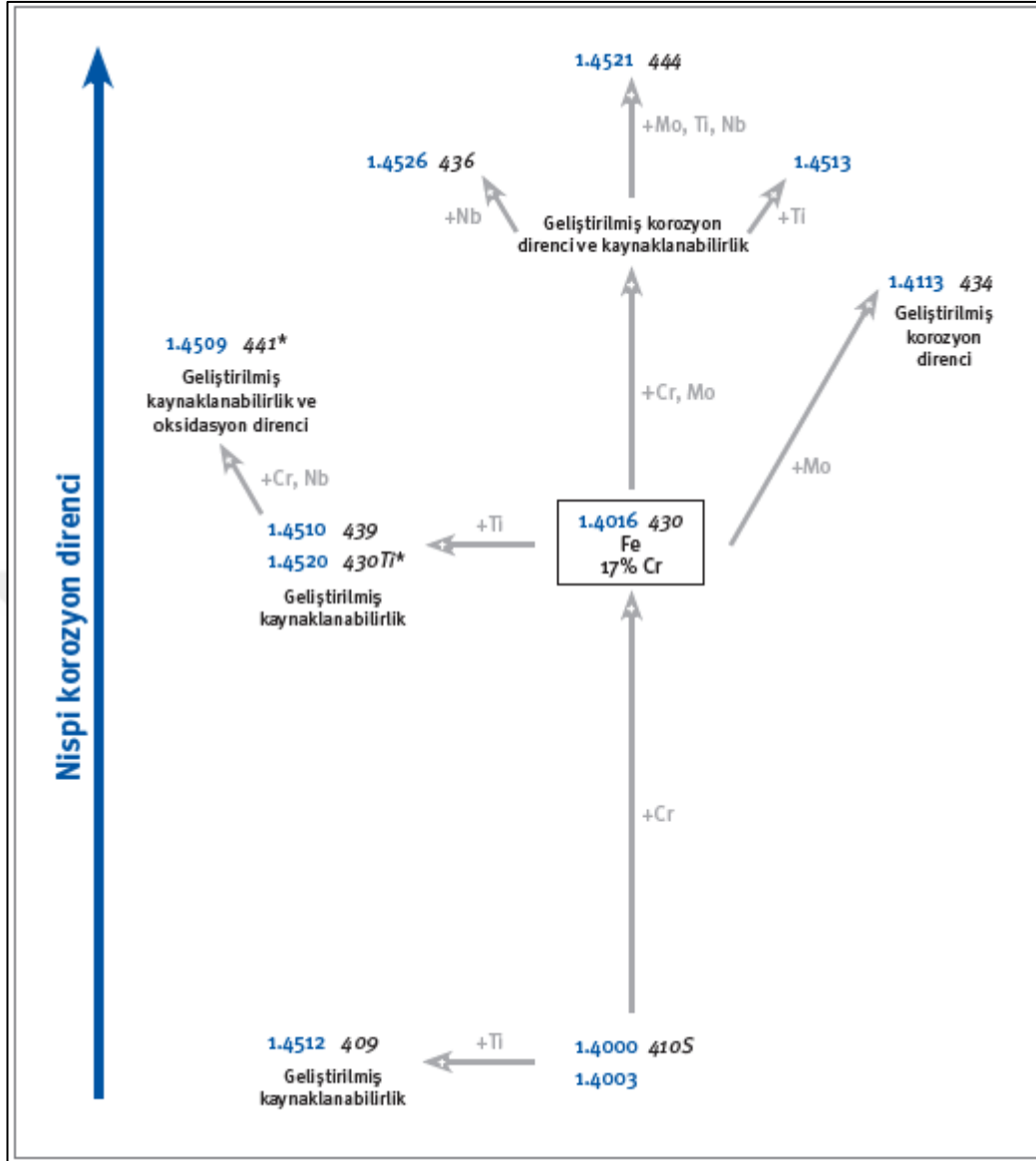
Bu paslanmaz çelik grubunda, korozyona karşı direnç açısından  $M_{23}C_6$  karbürü önemli bir etkiye sahiptir. Yapısında düşük karbon ve %18 Cr barındıran alaşıma eklenen nikel,  $\gamma$  fazı oluşum bölgesini genişletir ve nikel oranı %8'e geldiği anda  $\gamma$  alanı oda

sıcaklarına kadar ulaşır. Bu durum, bilindik östenitik çelik çeşidi olan ve bünyesinde %18 Cr ve %8 Ni barındıran çelik grubunun oluşmasına sebebiyet vermiştir [29].

### **3.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler**

Ferritik paslanmaz çeliklerin bileşiminde %10-30 arası krom alaşım elementi bulunmaktadır. Başlıca alaşım elementi krom olmakla birlikte korozyon dayanımını yükseltmek için molibden, kaynak kabiliyetini yükseltmek içinde titanyum, niyobyum ve alüminyum kimyasal kullanılmaktadır [31]. Ferritik paslanmaz çelikler sadece 1913 yılından beri yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır. Ancak 1970’li yıllardan itibaren otomotiv sanayinin gelişimine paralel olarak yeni yatırımlarla hızla büyümüşür ve 2000’li yıllarda hayatımızın tamamına yakın kısmına girerek nispeten yeni mühendislik malzemeleri olarak ortaya çıkmaktadır [32].

Ferritik paslanmaz çelik grubunda tane büyüklüğünün, içyapı ve özellikler üzerindeki etkisi göz ardı edilmemelidir. Bu açıdan değerlendirildiğinde tokluk, tane büyüklüğünün artması ile azalır ve mukavemet düşük seviyede etkilenir. Ferritik kafes yapısında atom hareketlerinin rahat ve kolay bir şekilde meydana gelmesi, ferritik kromlu çeliklerin yüksek sıcaklıklarda Cr-Ni östenitik çeliklere göre biraz daha seri bir şekilde tane büyüklüğünü ortaya çıkarması, ferritik grubu çeliklerin imal edilmesinde ve işlenmesinde tokluk azalmasına sebebiyet veren tane büyüklüğünün göz ardı edilmemesini gerektirir. Bu açıdan, ferritik paslanmaz çeliklerin ısı işlemleri ve sıcak şekil değiştirme işlemleri sıkı bir kontrol altında tutulmalıdır [29].



Şekil 3.4. Ferritik paslanmaz çeliğin özellikleri [30].

AISI 430 Ferritik paslanmaz çelikler dünya pazarında sıklıkla kullanılan ileri seviyedeki mühendislik malzemesi grubudur. Öte yandan, östenitik çeliklerle mukayese edildiğinde biraz daha ekonomik olması ve yüksek korozyon direncine sahip olduğu için yaygın bir şekilde tercih edilmektedirler. Ayrıca, düşük Cr'li alaşımlar ve görselliğin birincil öncelik taşımadığı yerler için kullanılabilir [33,30]. Ferritik paslanmaz çeliğin bazı önemli özellikleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

### 3.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

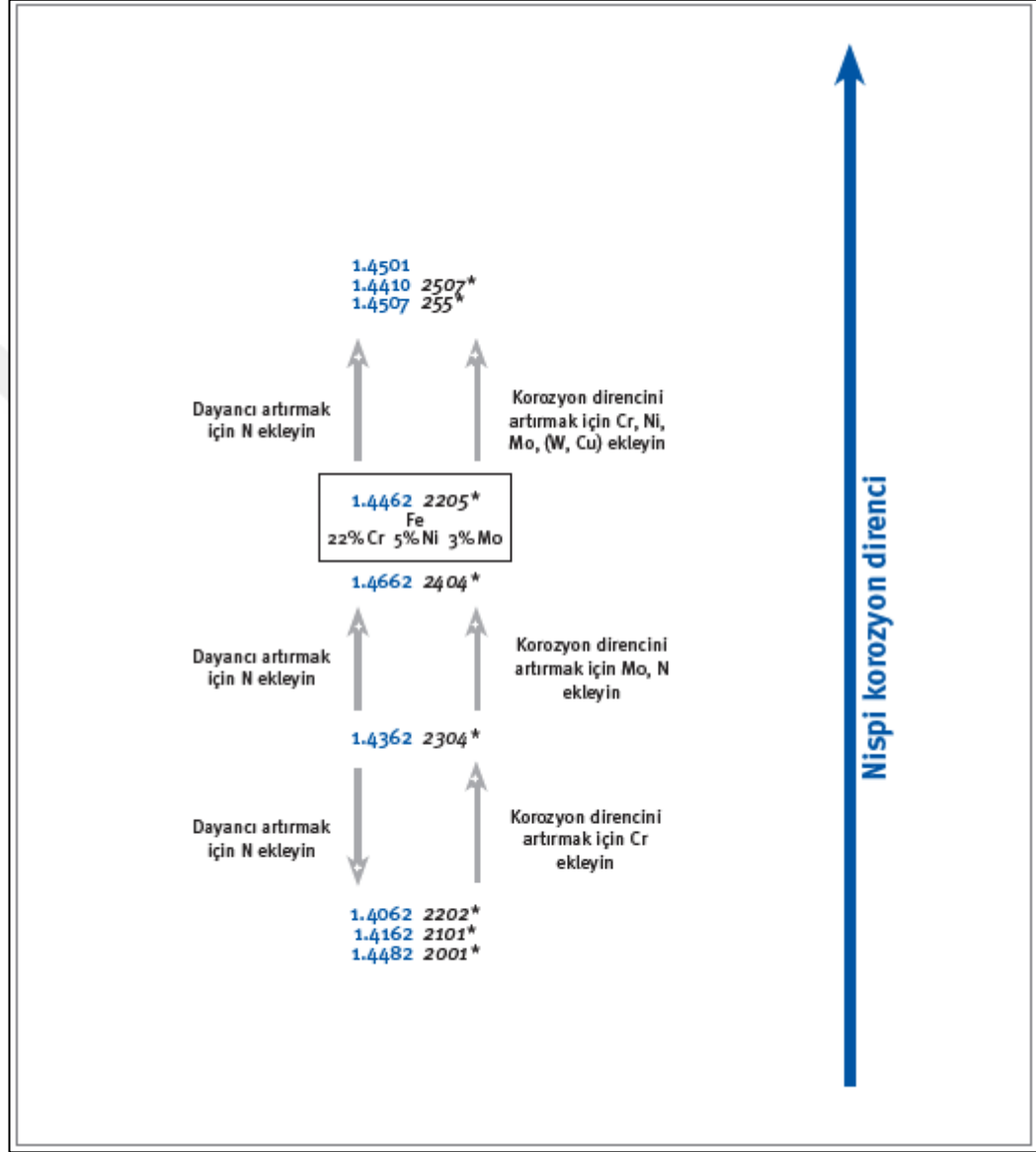
Çelikler yapısında %12-18 Cr ve %0,1'den fazla C barındırır ve yüksek sıcaklıklarda östenitik fazındadırlar. Çelikler, östenitik faza ulaştığı anda ve hızlı bir şekilde soğuma işlemine maruz kaldıklarında (sertleştirildiğinde), östenitik yapı martenzitik hale gelir. Östenitik yapı meydana getirmek için farklı kalite gruplarına göre sıcaklığın 950-1050 °C bandında oluşması şarttır. Ani soğutma ise alaşımsız çeliklere oranla daha yavaş olabilir [34].

Arzu edilen ürün çeşidi açısından martenzitik çeliklerin, yumuşak tavllanmış (sertleştirmeye hazır vaziyette) ya da sertleştirilmiş bir şekilde tedarigi sağlanmaktadır. Martenzitik çeliklerin soğuk ve sıcak haddelenmiş bandlarına ya da levhalarına, üreticisi tarafından sıcak ya da soğuk bir şekilde nihai ürün şekli oluşturulduktan sonra sertleştirme işlemi uygulanır (kıvrırmak, basmak, şekillendirici kesim, derin sığama, gibi). Diğer önemli bir işlem olan ıslah işlemleri ise sertleştirme ve sonucunda 650-750 °C'de menevişden meydana gelmektedir. Meneviş işlemi gerçekleştirildiğinde, malzemenin çekme dayanımı biraz düşer ve akışmazlık oranı ise yükselir. Sağlıklı bir korozyon direncini ve yüzeyin arzu edilen özelliklere sahip olmasını sağlamak için asit işlemi uygulanamamak yahut taşlama yapmak yeterli olacaktır. Martenzitik grubu paslanmaz çelikler, aşınmaya karşı yüksek dayanım sergilemeleri ve kesici özellikleriyle geniş bir yelpazede kullanılmaktadırlar [34].

### 3.2.4. Ferritik-Östenitik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Bu çelik grubu (Ferritik-Östenitik) iki farklı özellikteki bileşimden oluştukları için Dupleks çelikler olarak tanımlanmakta olup, gün geçtikçe daha çok önem kazanmaktadırlar. Bu bağlamda en yaygın kalite grubu olan X2CrNiMoN (1.4462), yapısında %22 Cr, %5 Ni ve %3 Mo ve az miktarda N barındırmaktadır. Dupleks paslanmaz çeliklerin oksidasyona karşı gösterdiği direnci, östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştığımızda, indüktif chlorid'e bağlı olarak gerilim kopması korozyonuna daha iyi dayanıklılık sergilediğini söyleyebiliriz. Bu paslanmaz çelik grubunun, kaynak edilebilirliği açısından herhangi bir sıkıntı gözükmemektedir. Genel açıdan değerlendirildiğinde, ağırlıklı olarak kimya endüstrisi tesislerinde, çevre

koruması ünitelerinde, denizcilikte ve off-shore teknik araştırmalarında kullanılmaları makuldür [34]. Dupleks paslanmaz çeliğın bazı önemli özellikleri Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Dupleks paslanmaz çeliğın özellikleri [30].

### 3.2.5. Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler

Yapısında Cu, Mo, Nb, Ti, Al gibi kimyasal elementleri barındıran çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler, belirtilen bu alaşımların biri ya da birden fazlasının etkisiyle çökeltme sertleşmesi sergileyen Demir-Karbon-Nikel paslanmaz çelik

sınıfının bir üyesidir. Genel olarak çökelme sertleşmesi, alaşımı çözeltiliye alma tavidan sonra yapılan ani soğutmayla bir yaşlandırma işlemi olarak açıklanabilir. Yukarıda bahsedilen ve çeliğin yapısında var olan kimyasal elementler, çözeltiliye alma tavi esnasında çözünürler, sonra yaşlandırma işlemi esnasında çok küçük tanecikler halinde çökerek sertlik ve mukavemet gibi mekanik özellikleri yükseltirler. Bu işlemler neticesinde elde edilen paslanmaz çelik, martenzitik çeliklerin mekanik özelliklerine ve AISI 304 (X5CrNi1810) türü östenitik paslanmaz çeliğin korozyon dayanımına ulaşabilmektedir. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerin taşıdığı en mühim özellik, normalize durumlarında rahatlıkla işlenip nihai şekle getirildikten sonra 480-600 °C’de bir ısıl işlem uygulanarak mekanik özelliklerinin üst seviyelere ulaşmasıdır. Bu çeliklerin dayanımları neredeyse 1700 MPa’ya kadar yükselebilmektedir. Bu durum, martenzitik paslanmaz çeliklerin dayanımlarının üstündeki seviyelere çıkabildiğinin göstergesidir [29].

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, çözeltiliye alma tavlamasından sonraki işlemler sonucu çeliğin yapısal değişimine ve özelliklerine bağlı olarak üç gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

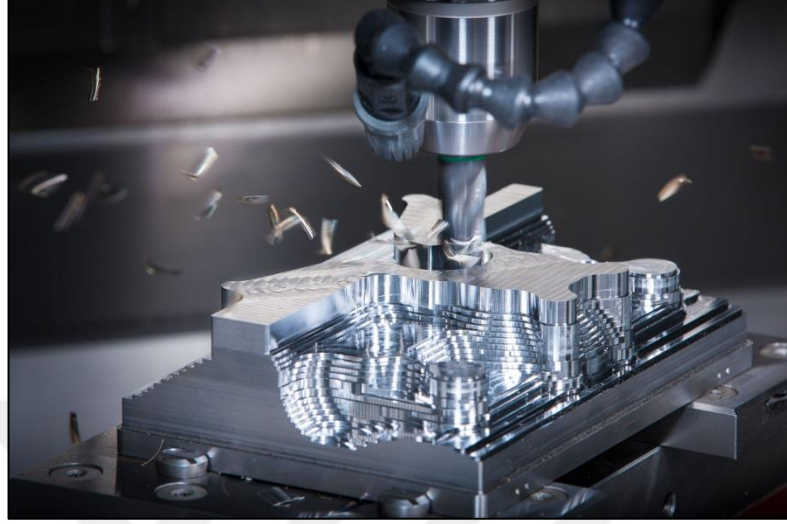
- Martenzitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler
- Yarı-östenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler
- Östenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerdir [29].

### **3.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİNİN İŞLENEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİ**

Östenitik paslanmaz çeliklerin talaşlı imalat noktasında kullanılması pek mümkün değildir. Bu çeliklere imal işlemleri sürecinde uygulanan soğuk şekillendirmeler; malzemenin yüksek mukavemette olmasına, ısı iletkenliğinin düşük olmasına ve elastikiyet değerlerinin yükselmesine sebebiyet vererek talaşlı imalat noktasında talaş kaldırılabirlik özelliklerini negatif açıdan etkilemektedir. Genel açıdan bakıldığında, paslanmaz çeliklerin talaş kaldırılabirlik özelliğine pozitif katkı sağlayan element kükürttür. Bu element diğer bir kimyasal element olan Mangan ile tepkimeye girdiğinde Mangan sülfid oluşmaktadır. Bu durum, işlemi kolaylaştırmak üzere kısa



parçacıklar halindeki talaşların düz yüzey oluşturmaya ve kullanılan araç gereçlerin daha az aşınmasına pozitif yönde katkı sağlamaktadır [34].



Şekil 3.6. Kesme işlemi [35].

Diğer yandan, paslanmaz çelikler genel olarak iyi şekil değiştirme özelliklerine sahiptirler, bu sebeple geniş yelpazede kullanım alanına ulaşmışlardır. Başka bir deyişle, paslanmaz çelik yassı ürünlerin üreticiler tarafından ciddi oranda şekillendirilerek nihai ürün haline getirilmeleridir. Bu ürünlerin oluşması için en çok kullanılan tekniklerden biri derin çekme işlemidir. Paslanmaz çelik malzemesinden arzu edilmesi planlanan birçok karmaşık unsurlu ürünlerin meydana gelmesi bu işlem tarafından gerçekleştirilmektedir. Ferritik paslanmaz çeliklerin istenilen şekillendirme nitelikleri, alaşımsız çeliklere yakın değerlerdedir. Bu çelik grubunda asıl arzu edilen nitelik, korozyona karşı dayanım olduğu için soğuk şekillendirme işleminin uygulanması mekanik özellik açısından sınırlıdır [34]. Östenitik paslanmaz çelikler soğuk şekillendirme sonucu, alaşımsız çeliklere ve ferritik paslanmaz çeliklere kıyasla daha yüksek mukavemet gösterirler. Bu sebeple, şekillendirilebilmeleri için daha fazla güç kullanımı şarttır. Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri, şekillendirilmeleri esnasında kısmen martenzitik iç yapı özelliğine sahip olabilmektedir. Bu durum, art arda çekme işlemi gerçekleştirildiğinde olumsuz yönde mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. Gerekli hallerde, ara tavlama yapılarak bu olumsuzluk giderilir [34].

## BÖLÜM 4

### LAZER TEKNOLOJİSİ

#### 4.1. LAZER TANIMI

Lazer ifadesi “uyarılmış ısınım yayımıyla ışığın yükseltilmesi”, olarak açıklanmaktadır. Lazer, sadece bir dalga boyu ile var olan yüksek ışıktır. Lazer atomik enerjiyi elektromanyetik enerjiye çevirmektedir. Lazerin keşfi ilk olarak Schawlow ve Townes aracılığıyla 1958 yılında “*Infrared and optical masers*” isimli çalışmalarında maser ifadesi olarak literatüre sunulmuştur. Bu kelime, atomların dış ortamdan uyarılması sonucunda meydana gelen radyasyonun, genlik seviyesi artırılmış elektromanyetik dalgayı oluşturmasını temsil etmektedir. Maser ilk olarak mikrodalga alanında çalışılmış olması suretiyle “*Microvawe Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” başlığından ortaya çıkarılmıştır. Maserler, renkli ışın sağlamak ve çeşitli unsurlar oluşturmak için optik düzenekler olarak da adlandırılabilir [36,37].

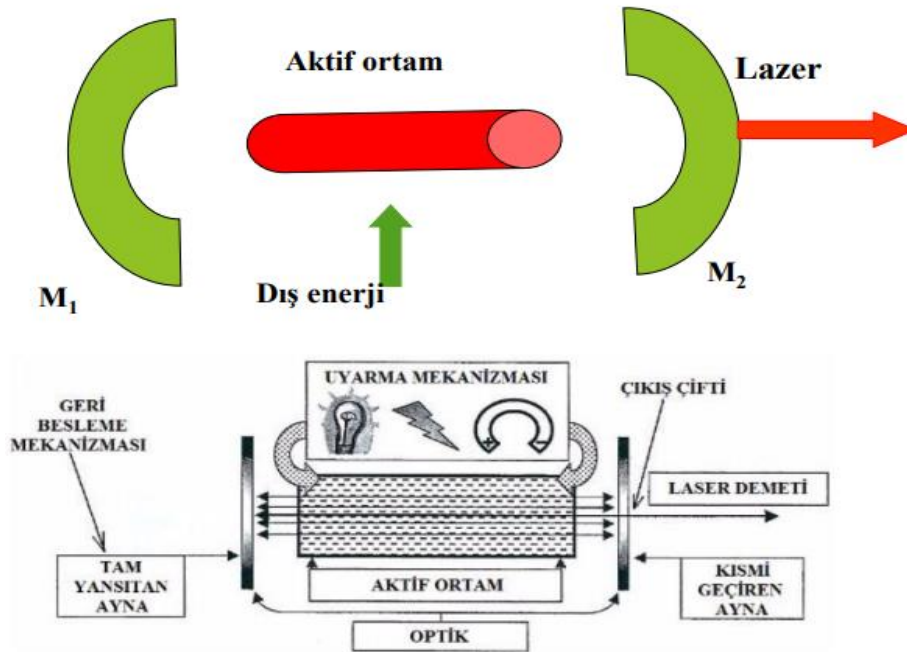


Şekil 4.1. Lazer kesim [38]

Süregelen seneler neticesinde 1970 yılında Gerry, karbonmonoksit ve hidrojenin oksijenle birlikte tepkimeye girip (yanma) karbondioksit ve su elementlerini oluşturmasıyla ilk gaz lazerini uygulamıştır. Bundan sonraki senelerde ise, boya lazerleri, eksimer ve diyot lazerleri keşfedilmiş ve geliştirilmiştir. Günümüz lazer teknolojisi ise şu anda, savunma, tıp, sanayi ve bilgisayar alanına varan çeşitli alanlarda aktif bir biçimde kullanılmaya elverişlidir [37].

## 4.2. LAZER ÇALIŞMA PRENSİBİ

Lazer kısaca açıklanacak olursa, uyarılmış ışık fotonlarının yaydıkları enerjinin birleşmesi (yoğunlaşması) ve akabinde lazer ışınının meydana gelmesiyle açıklanabilir. Lazerler, iki tane ayna arasına (biri %100 ve diğeri %98 olmak üzere) konumlandırılmış aktif ortam tarafından meydana gelir. Bu ortama dış taraftan ışık, ısı vs. enerji girişi sağlanarak foton yayılımı gerçekleştirilir. Aktif ortamda tetiklenen bu fotonlar, hedeflenen ışın için aktif rol oynayan aynalar arasında etkinliğini önemli derecede artırır ve belli bir sınır değerine eriştikten sonra %98 yansıtıcı aynadan tahliye olarak lazer ışınlarını meydana getirirler [39]. Şekil 4.2’de lazerin çalışma prensibi gösterilmiştir.



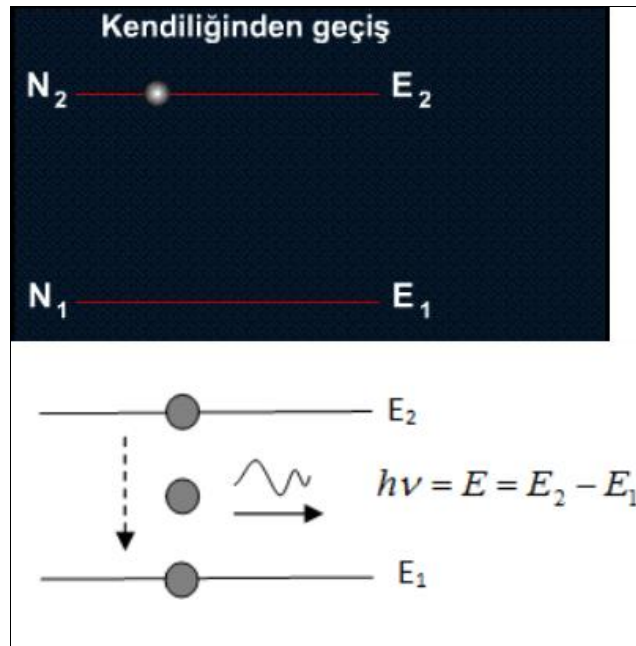
Şekil 4.2. Lazer çalışma prensibi [39].

Şekil 4.2’de gösterilen lazer çalışma prensibinde  $M_1$  %100 yansıtıcı aynayı,  $M_2$  %98 yansıtıcı aynayı ifade etmektedir. Ayrıca aktif ortam kısmı, Helyum-Neon,  $CO_2$ , Nd-YAG, Ti-Safir, Argon İyon, Yakut vb. gibi maddelerden meydana gelirken, dış enerji ise Isı enerjisi, ışık enerjisi, kimyasal enerjisi, elektrik enerjisi vb. enerjilerinden oluşabilmektedir. Lazerlerin çalışma prensibi ve fiilen uygulanması kolay olmasına rağmen ortaya çıkması biraz zaman almıştır. Lazerler, genel olarak üç yöntemden meydana gelmektedir. Bunlar;

- Kendiliğinden ışınma,
- Soğurma,
- Uyarılmış ışınma olmak üzere kendi arasında ayrılmaktadır [39].

**Kendiliğinden ışınma:**

Bu ışınma, yüksek seviyede var olan atomun kendi başına foton yayarak düşük seviyedeki atom haline ulaşmasıdır. Yayılma, belirli bir prensipte meydana gelmeli rastgele olmamalıdır [39]. Şekil 4.3’te enerji seviye ve kendiliğinden geçiş diyagramı gösterilmiştir.



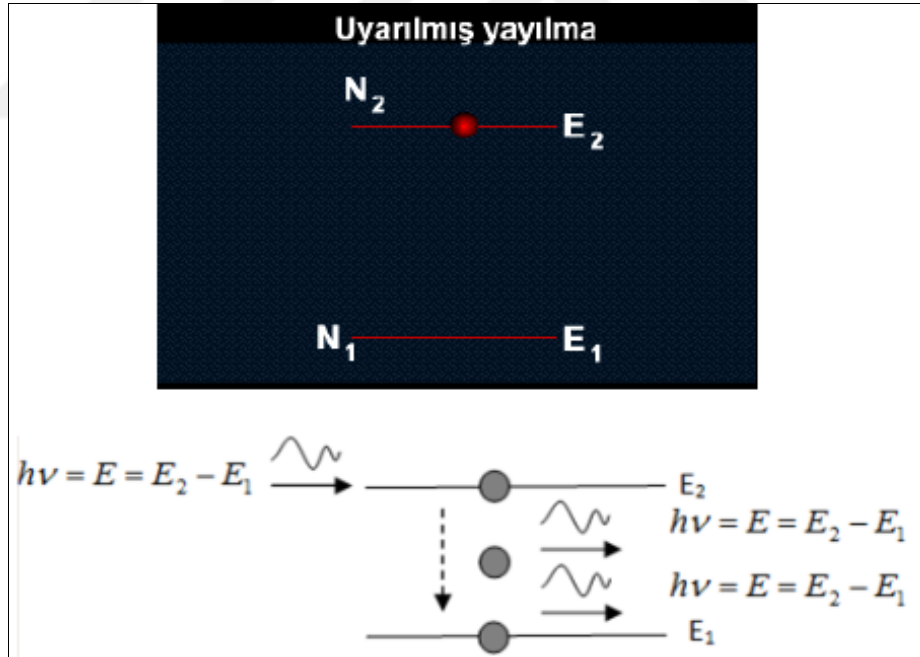
Şekil 4.3. Enerji seviye ve kendiliğinden geçiş diyagramı [40].

Şekil 4.3'te enerji seviye ve kendiliğinden geçiş diyagramı gösterilmiştir. Burada,  $E$  fotonun enerjisini,  $E_2$  yüksek seviyedeki enerji,  $E_1$  taban seviyedeki enerjiyi,  $h$  plank sabiti ( $6,62 \times 10^{-34}$  Js/molekül),  $\nu$  lazer ışığının frekansını ifade etmektedir.

Ayrıca, Şekil 4.3'te belirtilen kendiliğinden geçiş diyagramında atomun kararlılığının muhafaza edilebilmesi için çekirdek elektronu merkeze doğru çeker. Bu olay, Coulomb kuvveti ile adlandırılmaktadır [40].

### Uyarılmış Isıma:

Bu ışımda, yüksek derecede var olan atom foton zorlanması sonucunda düşük derecedeki atomun var olduğu dereceye düşer. Bu noktada uyarılma, basınç, ısı, elektron ve ışık demetine bağlı olarak oluşturulabilir [39]. Şekil 4.4'te enerji seviye ve uyarılmış yayılma diyagramı gösterilmiştir.

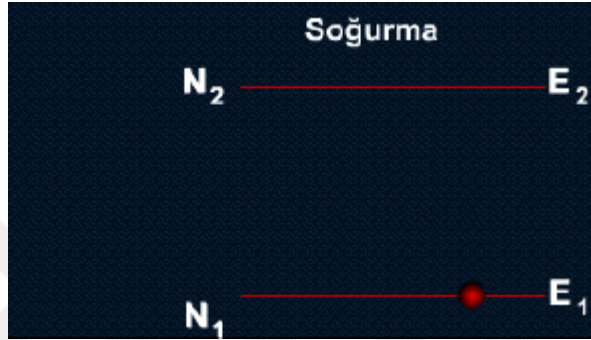


Şekil 4.4. Enerji seviye ve uyarılmış yayılma diyagramı [40].

Uyarılmış yayılda, dış etkenlerden tesir eden  $h\nu$  enerjili foton uyarılmış seviyedeki elektronla tepkimeye girerek aynı oranda enerjiye sahip bir fotonun daha yayılmasını tetikler. Sonuç olarak,  $h\nu$  enerjili iki fotonun yayılması sağlanmış olur [40].

### Soğurma:

Frekans tanımı  $\gamma$  olan elektro manyetik fotonun atomlara teması sonucunda, fotonun bünyesinde barındırdığı enerjiyi atom soğurur. Düşük enerjideki atomun foton soğurması, yüksek enerji seviyesine çıkmasını sağlar. Bu durum ise, atom enerjisinin yükselmesine sebebiyet vermektedir [39]. Şekil 4.5'te soğurma diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Soğurma diyagramı [40].

Soğurmada, dış etkenlerden tesir eden  $h\nu$  enerjili foton elektronu bir üst dereceye çıkarır. Bu olay ise, elektronun fotonu soğurması sonucu meydana gelmektedir [40].

## 4.3. LAZER ÇEŞİTLERİ

### 4.3.1. Optik Pompalamalı Katı Lazerler

Lazer tesirinin var olması için gereken yüksek enerji seviyesi ışık frekansıyla doğru orantılıdır. Ne kadar yüksek seviyede ışık frekansı oluşturulursa o kadar açığa çıkan enerji seviyesi artmaktadır. Bu bağlamda, bu işlemin verimliliği optik pompalama lazer çeşidi açısından düşük seviyede olduğu için etkili bir pompalama performansı sergilemesi elzemdir. Bu lazer çeşidi kısaca tanımlanacak olursa, yapısında makul bir malzeme çeşidinden üretilmiş uçları düz ve lazer ışığının yansımaya işlemini yerine getirebilmesi için ayna ile kaplı olan bir çubuk bulunmaktadır. Bu çubuğun, yan kısımları şeffaftır. Buradaki amaç, çubuğun iç kısmına pompalayıcıdan çıkan ışığın nüfuz etmesini sağlamaktır. Etkin bir rol oynayan pompalayıcı lamba, belirtilen malzemenin etrafına dolandırılmış, paralel bir şekilde yanına konumlandırılmış

olmakla birlikte, ayna vasıtasıyla çubuğa lambadan çıkan ışığın yansıtılması da gerçekleştirilmiş olabilir. Son olarak, bu lazer çeşidinde en yaygın yararlanılan kimyasal element neodimdir. Optik pompalama lazer çeşidinden yüksek seviyede güç üretilebilir [36].

#### **4.3.2. Sıvı Lazerler**

Katı lazerler, aşırı güç altında çalıştığı zaman malzeme yapısında hasar görme gibi negatif durumlarla karşılaşabilmektedirler. Bu durum, sıvı lazerde biraz farklıdır. Çünkü sıvı lazerde, belirli bir malzeme çeşidine göre imal edilmiş çubuk yerine şeffaf kısım içerisinde makul bir sıvı (neodim oksit) kullanılmaktadır. Bu bölüm arzu edildiği oranda geniş bir şekilde imal edilebilir ve böylece yüksek seviyede güç oluşturulabilir [36].

#### **4.4. ÇELİĞİN LAZER İLE İŞLENEBİLİRLİĞİ**

Lazerler iyi kesim kalitesi için CW modda, sözde anahtarlamalı modda veya darbeli modda kullanılır. Kesme gazı olarak oksijen kullanıldığında kesim kenarı çok az olmak üzere oksitlenir. 4 mm'ye kadar kesme gazı olarak yüksek basınçlı azot kullanmak mümkündür. Kesim kenarlarında bu halde oksit görülmez. Kesme hızı, oksijen ile elde edilen maksimum kesme hızının sadece %10 ile %30'una erişebilir. Daha zor şekilli parçalar için lazer ünitesi darbe modunda çalıştırılır. Bu dar açılı ve ince kesitli bağlantılardaki yanıkları önler. Çelikteki daha çok karbon ihtivası, kesim kenarlarındaki sertleşmeye ve köşelerdeki yanık izlerinin oluşmasına neden olacaktır. Sertliğin kesme hızı üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Alaşım yüzdesi yüksek olan malzemeleri kesmek düşük alaşımlı malzemeleri kesmekten zordur. Oksitli ya da kumlanmış yüzeyler daha düşük kesme kalitesine izin verecektir. Malzeme yüzeyinde oluşan, kalan sıcaklık kesme kalitesine negatif yönde etki eder. Çelikleri keserken gerilmelerin giderilmesi önemlidir. Haddeme ile oluşmuş iç gerilme de delme işlemine etki eder. Küçük boyutlu parçalarda ve 15-20 mm kalınlıklarda ince tane yapısına sahip çelik tavsiye edilir [36,37].

#### **4.4.1. Paslanmaz Çelik**

Bu malzemeyi delmek için eğer oksitli kenarlar önemli değil ise oksijen ile başka müdahaleye gerek kalmaksızın oksitsiz ve çapaksız bir delme için azot ile yüksek lazer gücü kullanarak yapılabilir. 5 mm'den itibaren tüm tabla yüzeyindeki paslanmaz çeliği azotla çapaksız delmek için odak pozisyonunun ayarı gerekmektedir. Odak noktasının yeniden ayarı temiz delme yapabilmeyi mümkün kılar. Plaka üzerinde yağ filmi tabakası oluşturmak, işleme kalitesini azaltmadan başlangıç deliklerindeki sonucun daha iyi olmasını sağlayacaktır [36,37].

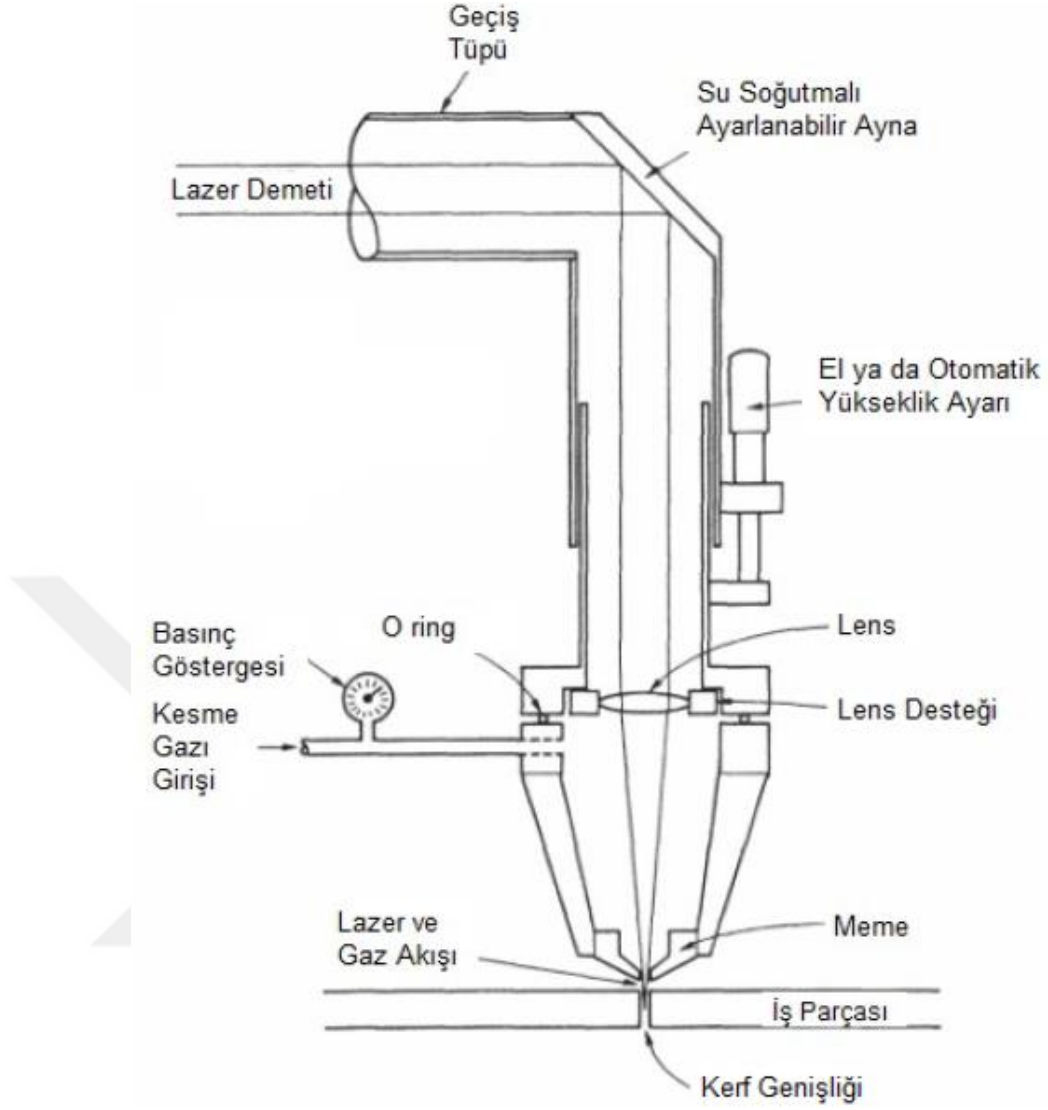
#### **4.5. LAZER İLE DELME İŞLEMİ**

Lazerle kesme günümüzde hızlı, düşük hasarlı ve sac üzerinden karmaşık şekilli parçaların kesilmesinde kullanılmaktadır.

Lazer kesim işleminin temel mekanizması aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Yüksek yoğunluktaki kızılötesi ışık ışını lazer tarafında oluşturulur.
- Işın sistem parçalarından biri olan lens yardımı ile iş parçası üzerine odaklanır.
- İş parçası üzerine gelen ışın malzemeyi ısıtır ve etki ettiği bölgeyi eritir (genellikle 0,5 mm'den küçük çapta).
- Ergimiş malzeme, lazer ışını ile birlikte iş parçasına etkiyen basınçlı gaz yardımı ile kesilen bölgeden uzaklaştırılır [41].





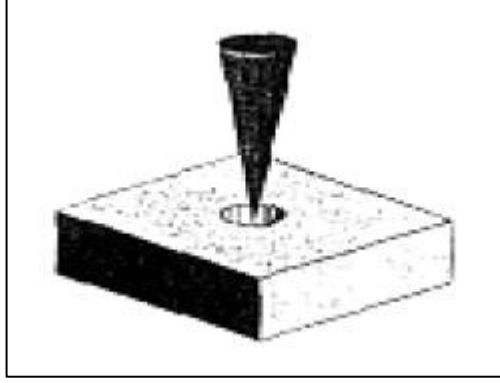
Şekil 4.6. Lazer kesme prosedürü [41].

#### 4.5.1. Lazer ile Delme Yöntemleri

##### Tek atım delme:

Bu delme yönteminde yeterince yüksek enerjili lazer atımı ince bir tabakada, ya genişliği 1mm'den küçük, baştanbaşa bir delik açmak için ya da kalın bir tabakada kör, sığ bir delik açmak için kullanılır. Lazer atım genişliği, atım başına birkaç ya da onlarca J'lük enerjili, milisaniyelerden, atım başına onlarca mJ'lük enerjili onlarca nano-saniyelere uzanır. Genellikle atım enerjisi arttıkça delik derinliği ve çapı artar. Tek atım delme, yeniden şekillendirme, sıçrayan malzeme kalıntısı ve koniklik

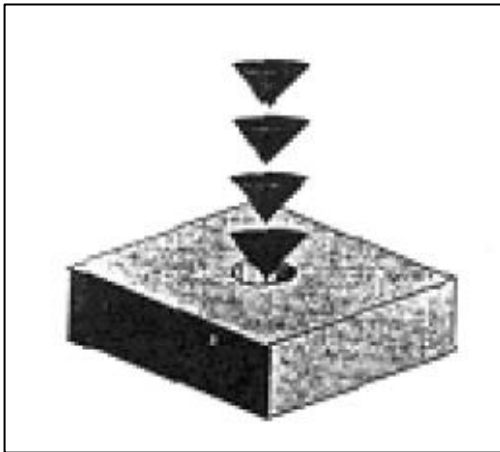
açısından zayıf toleransa sahiptir. Delik kalite ve netliği atım genişliğinin azalmasıyla, iyileştirilebilir [42].



Şekil 4.7. Tek atım lazer metodu [42].

**Darbeli delme:**

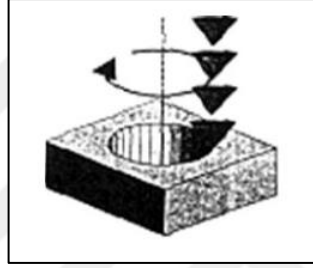
Bu delme tekniğinde yüksek hızda, kısa süreli özdeş lazer atım serisi, tek bir noktaya yönlendirilerek nispeten, daha kalın bir tabakayı delmek hedeflenir. Her bir lazer atımı malzemeden belirli bir derinliğe kadar materyal çıkarılmasına neden olur. Böylelikle atım sayısı arttıkça derinlik de artar. Deliğin konik olma durumu nispeten daha azdır. En popüler delme yöntemlerinden biridir ve yanma odaları, türbin ve kanatlarda çok sayıda delik açmak için kullanılır [42].



Şekil 4.8. Darbeli delme lazer metodu [42].

### **Kuyu delme burgusu:**

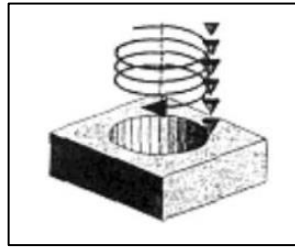
Bu delme türü, çok büyük delikler açmada kullanılır, bir kontur çevresinde, birbirleriyle örtüşen delikler serisi ile elde edilir. Ya yüksek tekrar sayısına sahip atımlı lazer, sürekli lazer (CW) ya da yarı CW lazerle yapılabilir. Kalın biri iş parçasında, ilk olarak pilot delik, darbeli delme ile oluşturulur. Daha sonra, lazer ışını, gittikçe artan, dairesel bir yol boyunca hareket ettirilerek, birbiri ile örtüşen, lazer atımları ile genişletilir. Delik herhangi bir şekil ya da büyüklükte, dairesel ya da dairesel olmayan şekillerde olabilir [42].



Şekil 4.9. Kuyu delme burgusu [42].

### **Sarmal kuyu delme burgusu:**

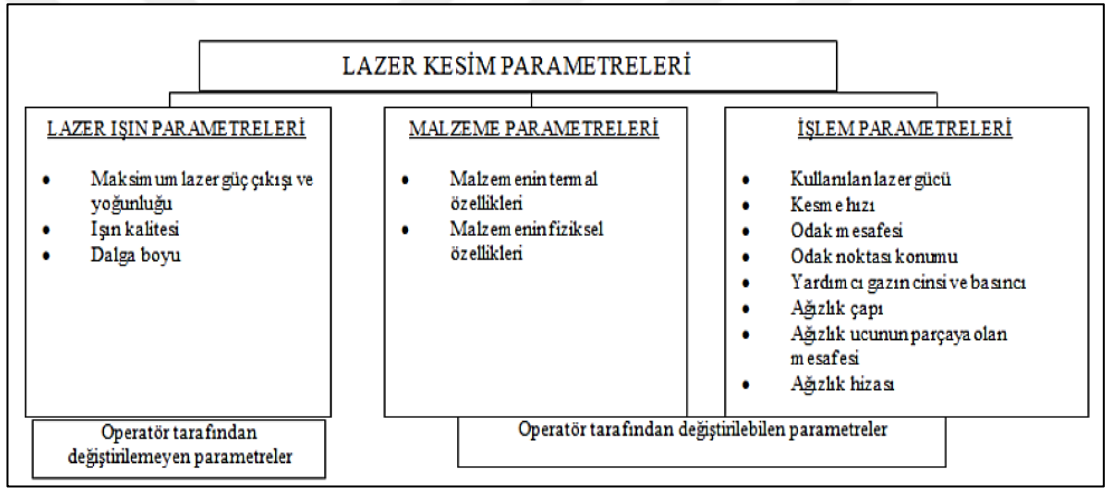
Bu teknikte; odaklanmış lazer ışını kendi çevresinde döndürülür ve kademeli biçimde, her bir spiral dönüş odak pozisyonundan aşağı doğru deliği derinleştirir. Lazer ışının odağının, daima deliğin arkasında kalması için ayarlanır. Öncelikle bir baştanbaşa delik oluşturulur, sonra lazer ışını deliğin etrafında birkaç kez döndürülerek, kenarları düzeltilir. Bu yöntemle oldukça büyük, derin ve kaliteli delikler elde edilir [42].



Şekil 4.10. Sarma kuyu delme burgusu metodu [42].

## 4.6. LAZER KESME PARAMETRELERİ

Lazer kesme işleminin kalitesi, genel olarak malzeme, lazer sistemi ve operasyon parametreleri tarafından belirlenir. Lazer sistemi parametreleri, ışın dalga boyu, maksimum lazer güç çıkışı, lazer ışın kalitesi, kesilen malzemenin özellikleri ve kalınlığını içermektedir. Operasyon parametreleri ise lazer gücü, kesme hızı, merceğin odaklama mesafesi, odak noktasının iş parçası üst yüzeyini takibi, yardımcı gazın basıncı ve türü, ağızlık çapı ve ağızlığın iş parçası üst yüzeyine olan mesafe ayarını kapsamaktadır. Malzeme cinsi ve kalınlığına bağlı olarak bu parametreler değiştirilir. Şekil 4.11’de lazer kesim parametreleri şematik olarak gösterilmiştir [7].



Şekil 4.11. Lazer kesim parametreleri [7].

### 4.6.1. Lazer Işın Parametreleri

Işın parametreleri, lazer ışınının özelliklerini karakterize eder ve lazer güç çıkışını, ışın kalitesini, ışın dalga boyu ve polarizasyonunu ihtiva eder. Lazer ışını, ışının dalga boyunun, polarizasyon durumunun, yüzeyin optik özelliklerinin ve ışığın geliş açısına bağlı olarak belirli oranda iş parçası yüzeyine yansıtılır ve emilir [7].

#### Lazer çıkış gücü ve yoğunluğu:

Lazer gücü, birim zamanda (sn) lazer ışığı formunda yayılan toplam enerjidir. Lazer ışın yoğunluğu ise, gücün lazerin yoğunlaştırıldığı alana bölünmesiyle elde edilen bir

parametredir. Yüksek ışın yoğunluğu kesme uygulamaları için istenilen bir özelliktir. Çünkü bu özellik kerf aralığının çok kısa zamanda hızlı bir şekilde ısınmasını sağlar ve böylece yüksek kesme hızları ve mükemmel kesme kalitesi elde edilmiş olur [7].

#### **Işın kalitesi:**

Lazer ışın kalitesi, ışın kesit düzlemindeki enerji dağılımını temsil eden bir lazer ışın modu ile karakterize edilir. Tekdüze bir enerji dağılımına sahip iyi bir ışın modu, lazer kesme için son derece önemlidir. Çünkü hassasiyeti ve kesme hızını arttıran yüksek güç yoğunluğunu ancak böyle bir ışığın küçük bir noktaya odaklanması ile mümkün olur. Yüksek düzensizliğe sahip modlar malzemenin kerf dışında ısınmasından dolayı zayıf kesme kalitesi ile sonuçlanmaktadır [7].

#### **Dalga boyu:**

Metal malzemelerin ışığı yansıtılma özelliği lazerlerin dalga boyunun bir fonksiyonudur. Metaller uzun kızılötesi dalga boylarını (CO<sub>2</sub> lazer dalga boyu), kısa kızılötesi dalga boylarından (Nd: YAG lazer dalga boyu) daha iyi yansıtır [15,17]. Bir Nd: YAG ışını daha iyi hassasiyet, daha dar bir kerf genişliği ve daha kaliteli bir kesme yüzeyi sağlamak amacıyla, CO<sub>2</sub> lazer ışınına kıyasla, daha küçük çaplara odaklanabilir [7].

#### **4.6.2. Malzeme Parametreleri**

Lazer ışını çok farklı termal ve fiziksel özelliğe sahip malzemelerin kesilmesinde kullanılır. Metal malzemelerinin ergime sıcaklıkları yüksek olduğundan kesme işlemi için yüksek güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Metal dışı malzemelerin kesimi düşük güç yoğunluklarında gerçekleştirilebilir [7].

Lazer kesimin etkinliği, lazer enerjisinin malzemeye nüfuz etme miktarına bağlıdır. Bu yüzden malzemenin termal özellikleri lazerin kesme kabiliyeti ve kesme işleminin kalitesinde büyük rol oynamaktadır. Bazı metallerin kızıl ötesi lazer ışınını yansıtma kabiliyetinin yüksek olması, kesme işleminin başlamasını zorlaştırabilir. Yüksek

termal iletkenliğe sahip bir metalin kesilme işlemi esnasında, ısı kesim bölgesinden malzemeye doğru hızla yayılmaya başlar. Bu yüzden esas kesme bölgesinde yüksek güç seviyeleri ya da düşük kesme hızları gerekmektedir [7].

#### **4.6.3. İşleme Parametreleri**

İşlem parametreleri kesme işleminin kalitesinin geliştirilmesi ve başarılı bir kesim sonucu elde etmek için değiştirilebilen karakteristikleri ihtiva eder. Ama bazı işlem parametreleri operatör tarafından değiştirilemez [7].

##### **Sürekli dalga (CW) ve darbeli lazer gücü:**

Yüksek gerilim darbeli veya sürekli ışınla sağlanabilir. Darbeli kesimde en yüksek darbe gücü ve sürekli kesimde ortalama güç, ışının nüfuziyet derinliğini belirler. Yüksek bir sürekli dalga lazer ışını özellikle daha kalın kesitli malzemelerde, yüksek kesme oranlarına sahip uygulamalarda düz bir kesim için kullanılır. Çünkü en yüksek kesme hızları yüksek ortalama güç seviyelerinde elde edilir. Fakat kesme kalitesinin bozulması ve iş parçasının ısınmasına sebep olan, kerf çeperinden iş parçasının diğer kısımlarına transfer edilen ısıyı önlemede yetersizdir [7].

##### **Merceğin odaklama mesafesi:**

Katı hal lazerinde ışını yönlendirmek için genellikle fiber optik kablolardan yararlanır. Işık kablosunda paralel demet halinde yayımlanan lazer ışınını biçimlendirmek için ise kolimatörler kullanılır. Lazer ışını ışın kablosundan ve kolimatörden geçtikten sonra, bir odaklama merceği paralel ışın demetini iş parçası yüzeyine odaklar. CO<sub>2</sub> lazerlerin dağıtımı için fiber optik kablo kullanılmaz. Bu yüzden lazer kaynağından yayılan ışın doğrudan mercek ile malzeme yüzeyine odaklanır [7].

### **Malzeme yüzeyine bağlı odak pozisyonu:**

Odak pozisyonu optimum kesme kalitesini sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır. Malzeme kalınlığındaki farklılıklar, odak değişikliği ve lazer ışın yoğunluğunda çeşitlenmelere yol açar. Oksijen destekli kesimde maksimum kesme hızları, ışının odak yüzeyi ince levhalar için düzlem yüzeyi ve kalın levhalar için tabandan levha kalınlığının üçte biri kadar yüksekte ayarlandığında başarılabilmektedir. Fakat asal bir gazın kullanıldığı kesimlerde optimum pozisyonlar alt yüzeye yakın yerlerdir [7].

### **Kesme hızı:**

Kesme hızı, lazer gücü ve gaz akış oranı ile dengelenmelidir. Kesme hızının artmasıyla kesme kenarında oluşan şeritler daha da belirginleşir, kesme kenarı altında cüruf biriktirme artar ve nüfuziyet azalır. Yumuşak çelik keserken oksijen kullanıldığında, düşük kesme hızlarında, kesme kenarlarında aşırı yanmalar meydana gelir. Bu da kenar kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi genişletir. Genellikle malzemeler için kesme hızları malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Hız, keskin köşe kesimlerindeki yanmalardan kaçınmak için azaltılmalıdır [7].

### **İşlem gazı ve gaz basıncı:**

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yaygın olarak kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajları ile oksijen (aktif gaz) ve nitrojendir. Nitrojen gazı, kerf aralıklarından cürufu uzaklaştırmak için daha yüksek basınç gerektirdikleri için paslanmaz çelik, alaşımlı çelik, alüminyum ve nikel alaşımlarının kesiminde kullanılırlar. Yüksek gaz basıncı ergimiş malzemeyi kerf aralığından uzaklaştırmak için ekstra mekanik bir kuvvet sağlar [7].

Oksijen genellikle düşük alaşımlı çelik yumuşak çeliklerin kesilmesinde kullanılır. Oksijen kullanımı, kesit kalınlıklarının 12 mm'nin üzerinde olduğu ve yüksek kesme hızları için yüksek kesme gücü gerektiren işlemlerde ekzotermik bir reaksiyona sebep olur. Oksijen gazı ağızlık basıncı genellikle 0,5-5 bar arası bir basınçta tutulur. Oksijen

basıncı levha kalınlıkları arttığında yanma olayından kaçınmak için azaltılır ve ağızlık çapı arttırılır [7].

#### **Ağızlık apı ve dikine mesafesi:**

Ağızlık, kesme gazının kesme bölgesine lazer ışını ile eř eksenli bir biçimde taşınmasını sağlar ve ergime havuzundaki türbülansı minimuma indirmek için gaz basıncını ayarlar. Ağızlık tasarımı, özellikle de ağız kısmı tasarımı kesme gazı jetinin biçimini ve böylece kesme kalitesini belirler. 0,8-3mm arasında değişen ağız çapı, malzeme ve levha kalınlığına göre seçilir [7].

Dik mesafe ağızlık ve iş parçası arasındaki mesafedir. Bu mesafe, kesme kalitesini ve kesme performansını doğrudan etkileyen gazın akış modeline etki eder. Dik mesafenin fazla olduğu durumlarda gaz basıncı düşer. Dik mesafenin ağızlık çapından daha kuk olması önerilir [7].

#### **Ağızlık hizası:**

Lazer ışını ile kesme gazı jeti eksenleri arasındaki uyumsuzluk dşuk kesme kalitesine sebep olur. Ağızlıktan çıkan ve ağızlık ile eř eksenli gaz akışı, malzeme yüzeyinde bir basınç meydana getirir. Eğer ağızlık ve odaklanmış lazer ışını eř eksenli ise gaz jeti tam ağızlık merkezinden geçerek düzgün bir akışa sahip olacaktır [7].



## BÖLÜM 5

### MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında, AISI 430 paslanmaz çelik malzeme üzerinde lazer ile delik delme işlemi belirlenen işleme parametreleri (odak noktası, basınç ve ilerleme hızı) çerçevesinde uygulanmıştır. İlk olarak, ferritik paslanmaz çelik malzemesi tedarikçi firmadan temin edilmiş ve delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra işleme parametrelerine bağlı olarak ortaya çıkan ve delik kalitesine etki eden çapak yükseklikleri ve yüzey pürüzlülükleri her bir deney için ölçülmüştür. Elde edilen bulgular optimizasyon açısından istatistiksel olarak incelenmiştir.

#### 5.1. DENEY NUMUNESİ

Deneysel çalışmalarda, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemesi iş parçası olarak kullanılmıştır. Lazer ile delik delme işleminde kullanılan deney numunesinin kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 1 ve Çizelge 2’de sırasıyla gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. AISI 430 kimyasal bileşim [43].

Cu	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
0,12	1,0	0,045	0,03	1,0	16,0-18,0	0,75

Çizelge 5.2. AISI 430 mekanik özellik [43].

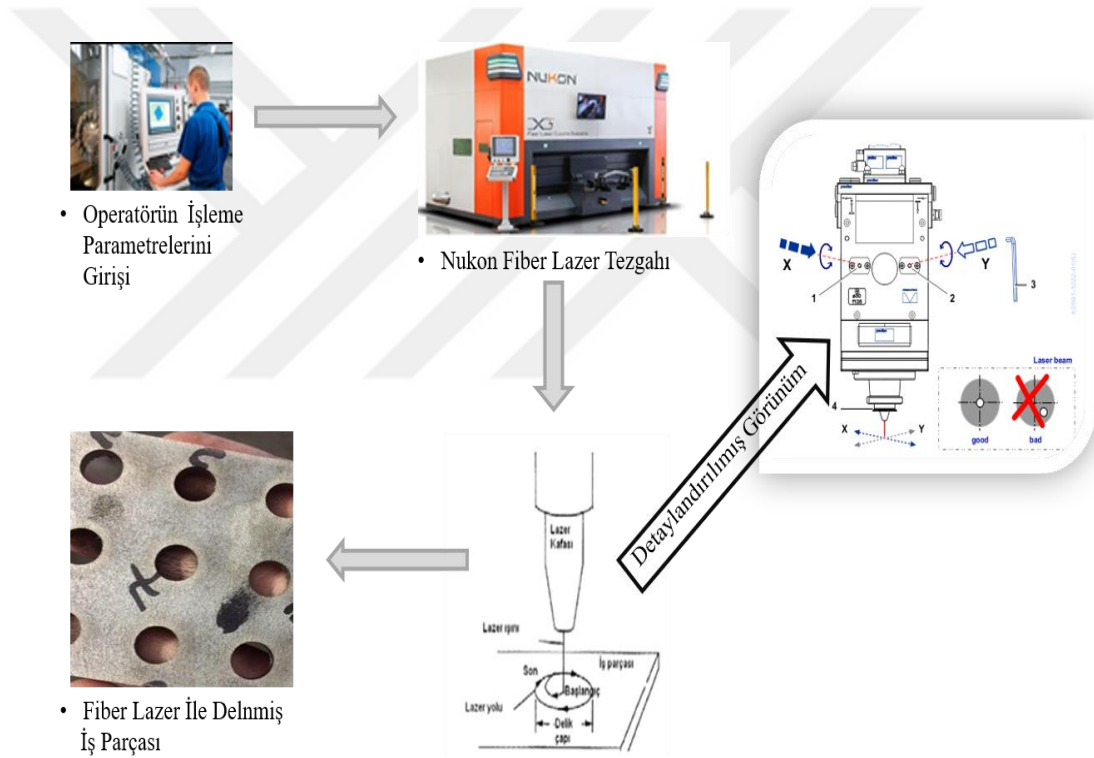
Çekme mukavemeti (MPa)	400-630
Akma mukavemeti (MPa)	240
Sertlik (HB)	200

Söz konusu iş parçasının endüstriyel alanda sıklıkla kullanılıyor olup, genellikle polisaj ve şekillendirme noktasında tercih edilmektedirler [43]. Bu çalışma kapsamında lazer ile delik delme işleminde, boyutları 100x100x5 mm olan ferritik paslanmaz çelik malzemesi üç ayrı plaka şeklinde kullanılmıştır. Her bir plaka için

farklı odak noktaları kullanılmış ve bu odak noktalarına bağlı olarak farklı ilerleme hızı ve basınç parametreleri çerçevesinde lazer ile delik delme işlemi uygulanmıştır.

## 5.2. DENEY DÜZENEĞİ

Lazer yöntemiyle delik delme işlemi şematik olarak gösterilmesi Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda, 5 eksen lazer kesim makinesi olan Nukon marka lazer işleme merkezinden faydalanılmıştır. Tezgahın çalışma aralığı X ekseninde 3050 mm, Y ekseninde 1300 mm, Z ekseninde 600 mm, B ekseninde  $135^{\circ}$  ve C ekseninde  $360^{\circ}$ ’dir.



Şekil 5.1. Lazer çalışma prensibi

Eksen hızları ise X, Y ve Z ekseninde 100 m/dak olurken, B ve C eksenlerinde ise 90 m/dak’dan oluşmaktadır. Pozisyonlanma hassasiyeti X, Y, Z ve B, C eksenleri için sırasıyla 0,0374 mm ve  $0,005^{\circ}$ ’dir.

5 mm kalınlığında ve 100x100 mm ebatlarından meydana gelen iş parçası Şekil 5.1’de belirtilen prosedür çerçevesinde lazer ile delinmiştir. Operatörün gerekli olan

parametreleri tezgaha girmesiyle başlayan süreç, lazer ışınının iş parçasına nüfuz etmesi ve delik oluşumunu tamamlamasıyla lazer ile delme işlemi tamamlanmaktadır. İncelenmesi hedeflenen işleme çıktılarının (yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği) ölçülmesi ile son bulmaktadır. Arzu edilen delik çapı 8 mm olarak girilmiş ve oluşturulan lazer ışını ile iş parçası üzerinde ergimiş malzemenin bertaraf edilmesi için azot gazı kullanılmıştır. Ayrıca lazer ışınının çıkış noktası olan ucun çapı (nozzle) ise 2,5 mm olarak kullanılmıştır.

### **5.3. DENEY TASARIMI**

Deneyleerin belirli bir teknik düzeninde yapılabilmesi için deney tasarımı olarak Taguchi metodundan faydalanılmıştır. Taguchi metoduna göre gerçekleştirilen deney tasarımında, birinci adım işleme çıktıları (çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü) üzerinde etkili olan işleme parametrelerini belirlemektir. Bu bağlamda, ilerleme hızı (mm/dak), odak noktası (mm) ve basınç (bar) lazer ile delik delme işleminde parametreler olarak belirlenmiştir. Her bir parametrenin üç seviyesi bulunmaktadır. Bu seviye değerleri, lazer ile delme işlemi gerçekleştirilen tedarikçi firmanın görüşleri alınarak belirlenmiştir. Tanımlanan parametreler ve seviyeleri çerçevesinde deney tasarımı olarak L<sub>27</sub> dikey dizin kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan deney tasarımı Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney tasarımı


Deney No	Odak noktası	Basınç (bar)	İlerleme hızı (mm/dak)
1	-5	12	1200
2	-5	15	1200
3	-5	18	1200
4	-5	12	1600
5	-5	15	1600
6	-5	18	1600
7	-5	12	2000
8	-5	15	2000
9	-5	18	2000
10	-4	12	1200
11	-4	15	1200
12	-4	18	1200
13	-4	12	1600
14	-4	15	1600
15	-4	18	1600
16	-4	12	2000
17	-4	15	2000
18	-4	18	2000
19	-3	12	1200
20	-3	15	1200
21	-3	18	1200
22	-3	12	1600
23	-3	15	1600
24	-3	18	1600
25	-3	12	2000
26	-3	15	2000
27	-3	18	2000

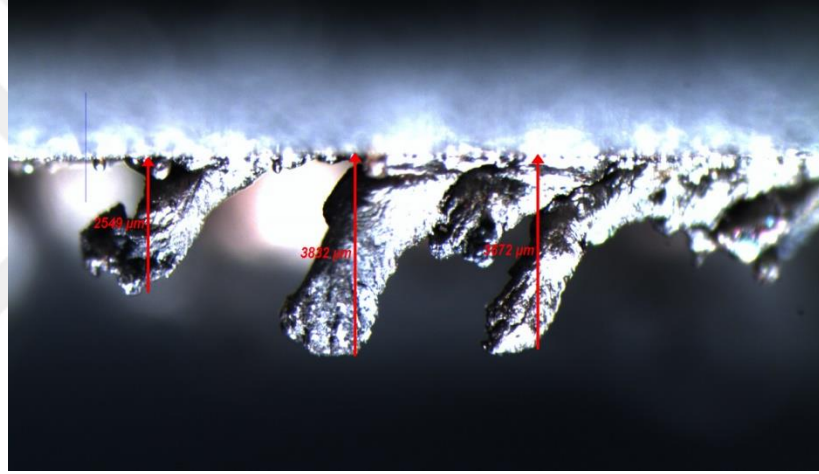
#### 5.4. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİ ÖLÇÜMÜ

Genel olarak çapak yüksekliği talaşlı imalat açısından değerlendirildiğinde ekonomi ve ürün kalitesi açısından önemli bir yere sahiptir. Bu durum bir diğer dinamik kesme prosedürüne sahip olan lazer teknolojisi ile ele alındığında, çalışılması zor fakat araştırılmaya da muhtaç bir şekilde kendini göstermektedir. Bu bağlamda, AISI 430 ferritik paslanmaz çelik malzemesinin çalışma kapsamında lazer ile delinmesiyle ortaya çıkan çapak yükseklikleri her bir deney neticesinde ölçülmüştür. Delik çıkış noktasında oluşan çapak yükseklikleri, CLEMEX adlı mikro kamera ile ölçülmüştür. Her bir delik çıkış noktasında meydana gelen çapaklar, üç farklı noktadan ölçülmüş ve

ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 5.4'te CLEMEX mikro kameranın bazı özellikleri ve Şekil 5.2'de ölçümü yapılmış örnek bir çapak görüntüsü gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Mikro kamera özellikleri [44].

Görüntü sensörü	CMOSIS CMV2000	
Optik biçimi	2/3"	
Piksel büyüklüğü	5.5 x 5.5 µm	
Çözünürlük	2048 x 1088 pixels	



Şekil 5 2. Örnek çapak yüksekliği

## 5.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMÜ

Talaşlı imalat tekniklerinde kesme işleminden sonra malzeme üzerinde odaklanması gereken kritik çıktılardan biriside yüzey pürüzlülüğüdür. Genel olarak, üretim tekniklerinin kullanılması sonucu oluşturulan her parçanın yüzey pürüzlülüğü farklıdır. Bu bağlamda, doğru parametreler ile kaliteli yüzey elde etmek birincil amaçlardan bir tanesidir. Lazer ile delik delme işlemi gerçekleştirilen çalışma kapsamında yüzey pürüzlülük değerleri de her bir deney için incelenmiştir. Bu çalışmada, elde edilen delik oluşumlarının yüzey pürüzlülük değerleri Mahrsurf M300 tipi yüzey pürüzlülük cihazında ölçülmüştür. Kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.5. Yüzey pürüzlülük cihazı özellikleri [45].

Tarama ucu	2 $\mu\text{m}$	
Temas hızı	0,5 mm/s	
Ölçüm aralığı	350, 180, 90 $\mu\text{m}$	
$L_t$	1,75, 5,6, 17,5 mm	
$\lambda$	0,25, 0,8, 2,5 mm	
Ölçüm kuvveti	0,7 mN	
Ölçme Prensibi	Tarama ucu yöntemi	

Lazer delme işlemi sonrasında yüzey pürüzlülük ölçümleri, meydana gelen her delik için  $120^\circ$ 'de bir (üç farklı nokta) yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılmıştır.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin fiber lazer ile delinmesinde kritik öneme sahip olan basınç, odak noktası ve ilerleme hızı gibi işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve çapak yükseklik değerleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Taguchi metodu aracılığıyla çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü için ayrı ayrı en uygun parametre seviyeleri belirlenmiştir. Kontrol edilebilen parametreler çerçevesinde (işleme parametreleri), Taguchi L<sub>27</sub> dikey dizinine göre toplam 27 adet deney gerçekleştirilmiştir. Fiber lazer ile delik delme işleminde işleme parametreleri giriş faktörleri, çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü ise çıkış faktörleri olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, varyans analiziyle (ANOVA) işleme parametrelerinin (odak noktası, basınç ve ilerleme hızı) yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği üzerindeki etki oranları belirlenmiştir.

Lazer ile delme işlemi sonucunda elde edilen veriler, grafikler yardımıyla değerlendirilmiş ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Deneyler neticesinde ulaşılan veriler, Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. Deney sonuçları.

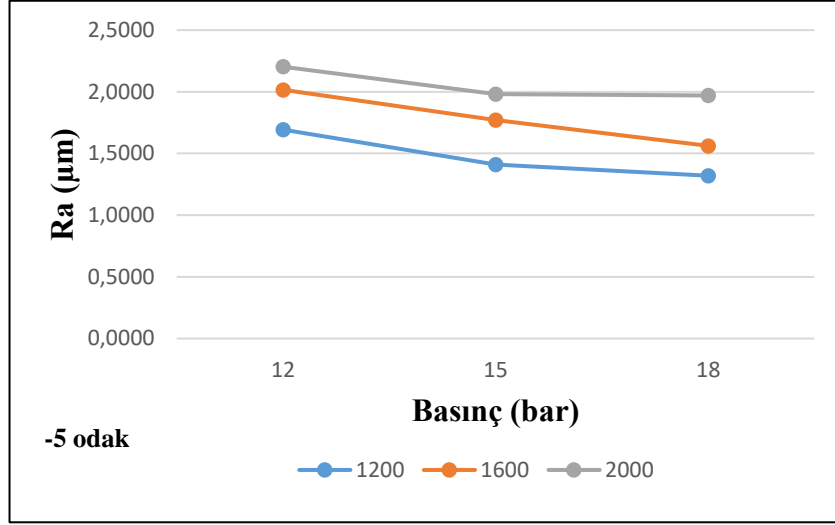
Deney No	Odak Noktası	İlerleme hızı (mm/dak)	Basınç (bar)	Ra (µm)	Çapak yüksekliği (µm)
1	-5	1200	12	1,6930	2100
2	-5	1200	15	1,4100	504
3	-5	1200	18	1,3200	623
4	-5	1600	12	2,0160	2851
5	-5	1600	15	1,7700	681
6	-5	1600	18	1,5620	864
7	-5	2000	12	2,2030	3401
8	-5	2000	15	1,9800	1672
9	-5	2000	18	1,9700	1987
10	-4	1200	12	1,6300	3171
11	-4	1200	15	1,6000	802
12	-4	1200	18	1,2500	1010
13	-4	1600	12	1,9300	3538
14	-4	1600	15	1,7500	1515
15	-4	1600	18	1,5270	1698
16	-4	2000	12	2,1000	3996
17	-4	2000	15	1,9000	3556
18	-4	2000	18	1,8500	2727
19	-3	1200	12	1,8600	2566
20	-3	1200	15	1,7010	1520
21	-3	1200	18	1,3920	999
22	-3	1600	12	2,1800	3093
23	-3	1600	15	1,9520	2014
24	-3	1600	18	1,5000	2275
25	-3	2000	12	2,3500	3904
26	-3	2000	15	2,1600	3127
27	-3	2000	18	1,8230	4039

## 6.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

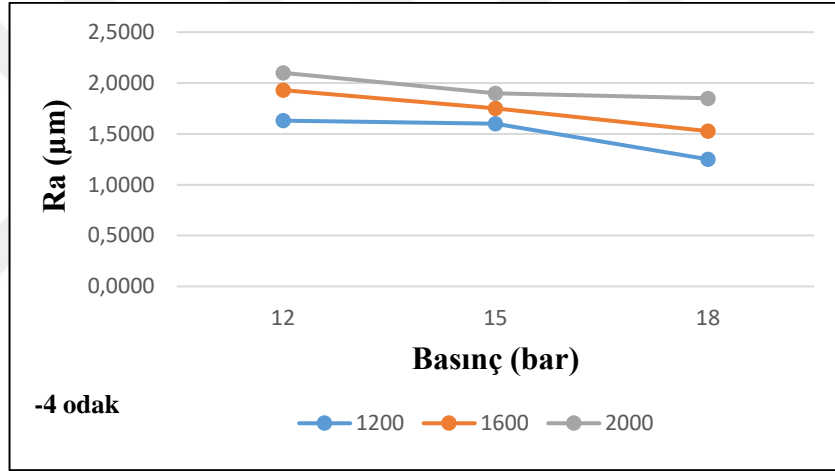
İmalat işlemlerinde, nihai ürüne ulaşma noktasında işlenebilirlik kriterleri son derece önemli bir rol oynamaktadır. Bu açıdan, yüzey pürüzlülük kriteri araştırılması gereken vazgeçilmez bir unsurdur. Standartların üstünde bir kalitede işlenmiş bir malzeme, mukavemet ve oksidasyon direncini önemli derecede arttırmış demektir [46]. Bu bağlamda, lazer ile delme işlemi sonrasında meydana gelen delik oluşumlarının yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve değerler incelenmiştir.

Şekil 6.1-6.3'te, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) sonuçları, odak noktasına (-5, -4 ve -3 mm) ve diğer işleme parametrelerine (basınç ve ilerleme hızı) bağlı olarak sırasıyla gösterilmiştir

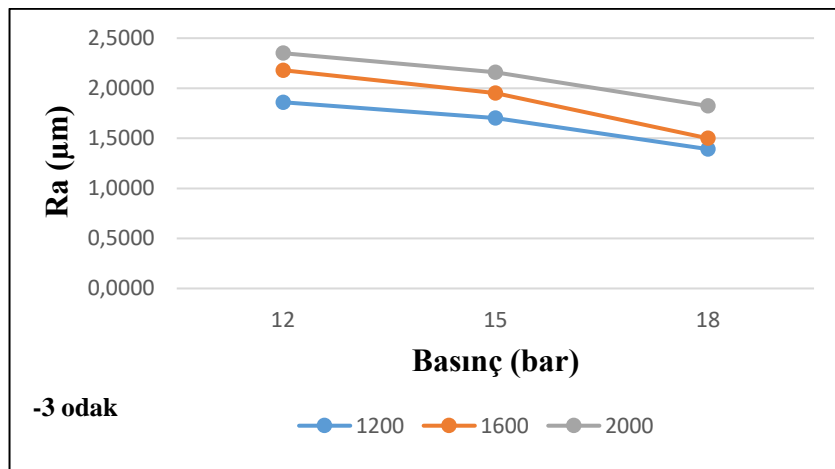




Şekil 6.1. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-5 odak).



Şekil 6.2. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-4 odak).



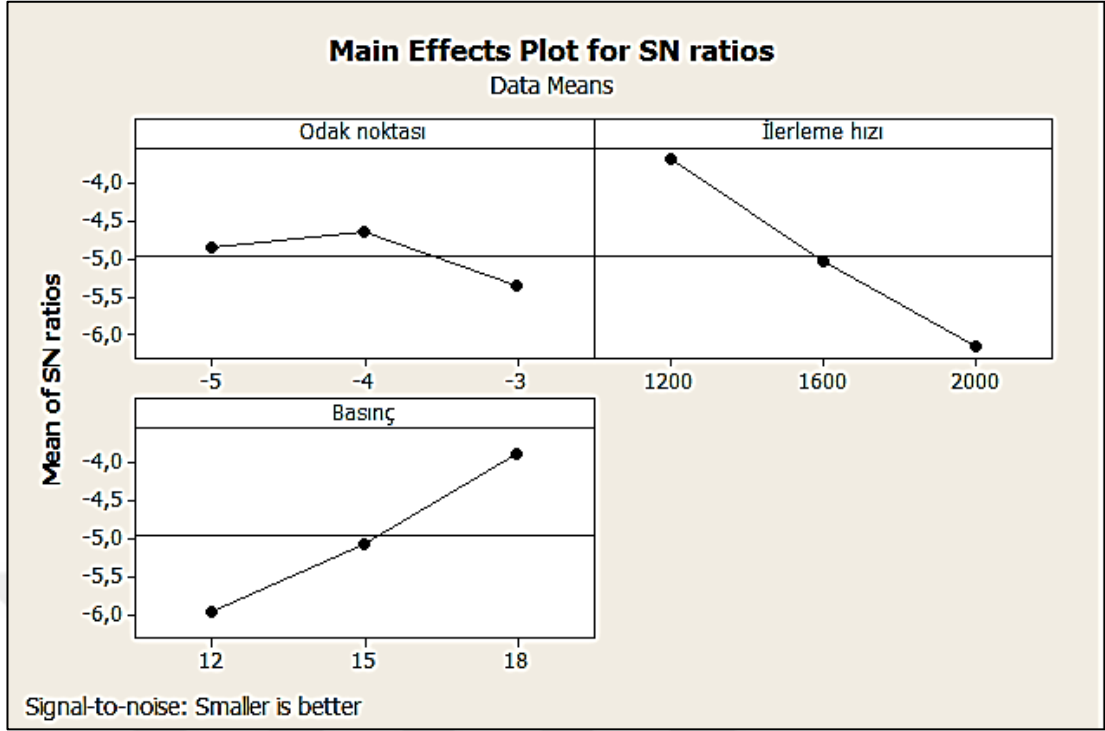
Şekil 6.3. İşleme parametrelerine bağlı olarak Ra'nın değişimi (-3 odak).

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, sabit basınçta ilerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Diğer yandan, sabit ilerleme hızında basıncın yükselmesiyle yüzey pürüzlülük değerlerinde bir azalma eğilimi tespit edilmiştir. Bu durumun, literatürde var olan bir çalışma ile mukayese edildiğinde tutarlı olduğu gözükmemektedir [9].

Sonuçlar neticesinde, en küçük Ra değeri odak noktası -3 için; basınç değeri 18 bar ve ilerleme hızı 1200 mm/dak olan işleme parametrelerinde 1,392 µm, en büyük değer ise 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 2,35 µm olarak bulunmuştur. Odak noktası -4 için en küçük Ra değeri; basınç değeri 18 bar ve ilerleme hızı 1200 mm/dak olan parametrelerde 1,25 µm, en büyük değer ise 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 2,10 µm olarak ölçülmüştür. Odak noktası -5 için en küçük Ra değeri; 18 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 1,320 µm, en büyük değer ise 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 2,203 µm olarak ölçülmüştür.

Her bir grafik incelendiğinde en küçük Ra değeri; -4 odak noktasında, 18 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 1,25 µm, en büyük ise -3 odak noktasında, 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 2,35 µm olarak ortaya çıkmıştır. Elde edilen en büyük ile en küçük Ra değeri arasındaki fark %88 olarak bulunmuştur.

Elde edilen veriler ışığında, minimum yüzey pürüzlülüğü için en uygun parametre seviyelerinin belirlenmesi noktasında Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi metodunda Ra değerleri için en küçük en iyi yaklaşımı hedef alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4). Daha sonra, deneysel sonuçlar neticesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirli bir öneme sahip olan işleme parametrelerinin etki oranları ANOVA ile belirlenmiştir (Çizelge 6.2).



Şekil 6.4. Ra için en uygun parametre seviyeleri.

Bu çalışma kapsamında ulaşılan bulgular çerçevesinde, yüzey pürüzlülük işleme çıktısı için en uygun işleme parametre seviyeleri Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Paslanmaz çeliğin fiber lazer ile delinmesinde bu seviyeler, en yüksek S/N oranı olarak kendisini göstermektedir. Bu çerçevede Şekil 6.4 değerlendirildiğinde, en uygun parametre seviyeleri odak noktası, ilerleme hızı ve basınç için sırasıyla -3, 2000 mm/dak, 12 bar olarak tespit edilmiştir.

AISI 430 ferritik paslanmaz çelik iş parçasının lazer ile delinmesinde ilerleme hızı, odak noktası ve basınç için üç farklı seviye kullanılarak 27 tane deney gerçekleştirilmiştir. Belirlenen parametrelerin Ra üzerindeki etki oranlarını istatistiksel olarak hesaplamak için %95 güven aralığında yapılan varyans analizinin sonuçları Çizelge 6.2'de sunulmuştur. Her bir parametrenin etki oranını ortaya çıkaran serbestlik derecesi (SD), kareler toplamı (KT), kareler ortalaması (KO), F değerleri ve yüzde etki oranları (PCR) gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Ra için varyans analizi.

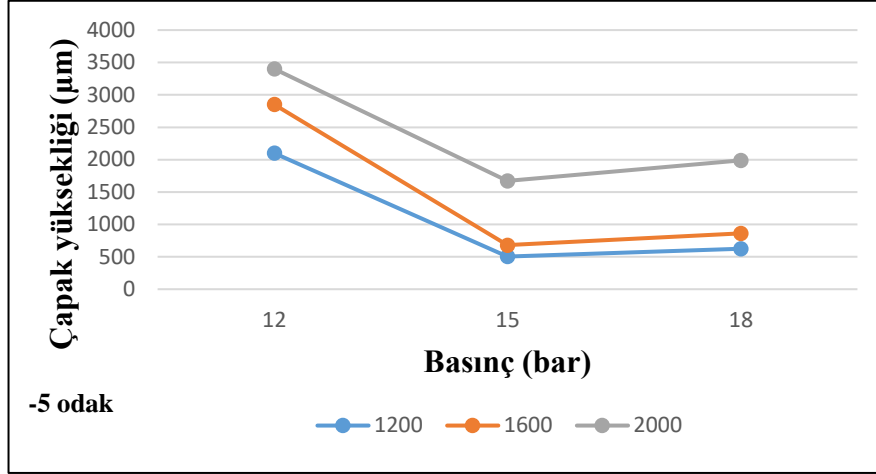
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F değeri	PCR (%)
Odak noktası	2	0,11278	0,05639	8,11	5,23
İlerleme hızı	2	1,11564	0,55782	80,18	51,70
Basınç	2	0,79033	0,39516	56,80	36,63
Hata	20	0,13914	0,00696		6,44
Toplam	26	2,15788			

Çizelge 6.2 incelendiğinde, işleme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etki oranını %51,70 PCR ile ilerleme hızı oluşturmaktadır. Ra üzerinde ikinci önemli parametre ise %36,63 PCR ile basınçtır. Öte yandan, %5,23 PCR ile azda olsa odak noktasının yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmektedir.

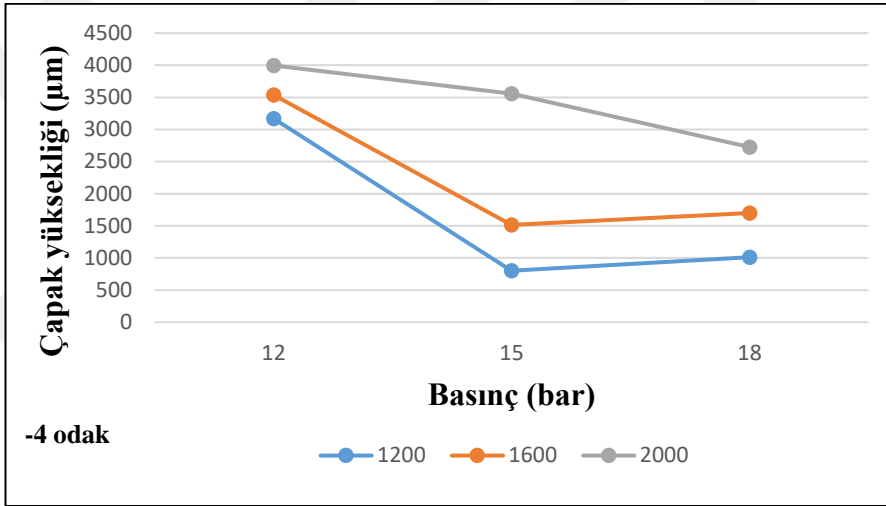
## 6.2. ÇAPAK YÜKSEKLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Delik delme işleminde odaklanması gereken bir diğer önemli işleme çıktısı ise çapak oluşumudur. İş parçasını kesme koşullarına, iş parçası çeşidine ve geometrik özelliklere bağlı olarak birçok durumdan etkilenmektedir. İmalat açısından çapak oluşumunu belirli parametreler çerçevesinde anlayabilmek oldukça karmaşık bir durumdur. Fakat, çapak oluşumunu var olan tekniklerle yorumlayabilmek veya fikir oluşturması açısından bulgulara ulaşmak mümkündür [47]. Bu sebeple, lazer ile delme işlemi sonrasında, delik oluşumlarının çapak yükseklik değerleri ölçülmüş ve işleme parametrelerinin çapak oluşumlarına etkisi hakkında fikir oluşturulmaya çalışılmıştır.

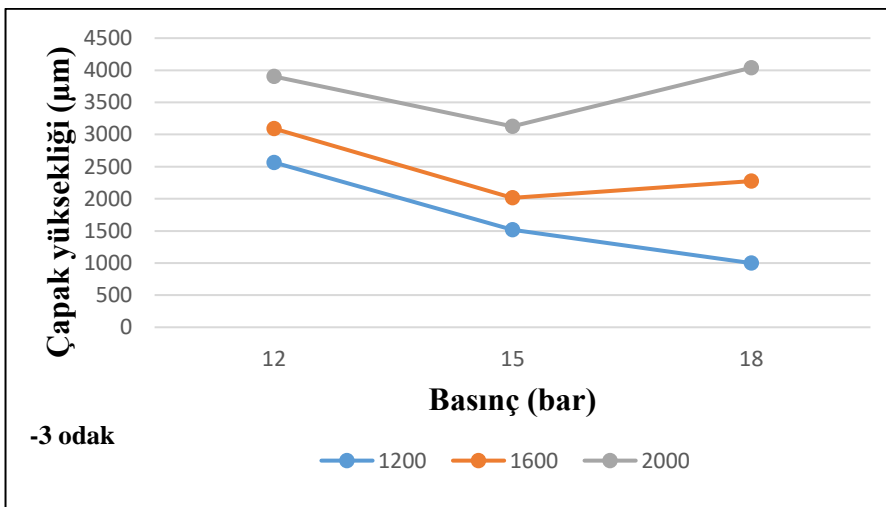
Şekil 6.5-6.7’de çalışma kapsamında elde edilen çapak yükseklik değerleri, odak noktası (-5, -4 ve -3 mm) ve diğer işleme parametrelerine (basınç ve ilerleme hızı) bağlı olarak sırasıyla verilmiştir.



Şekil 6.5. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-5 odak).



Şekil 6.6. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-4 odak).



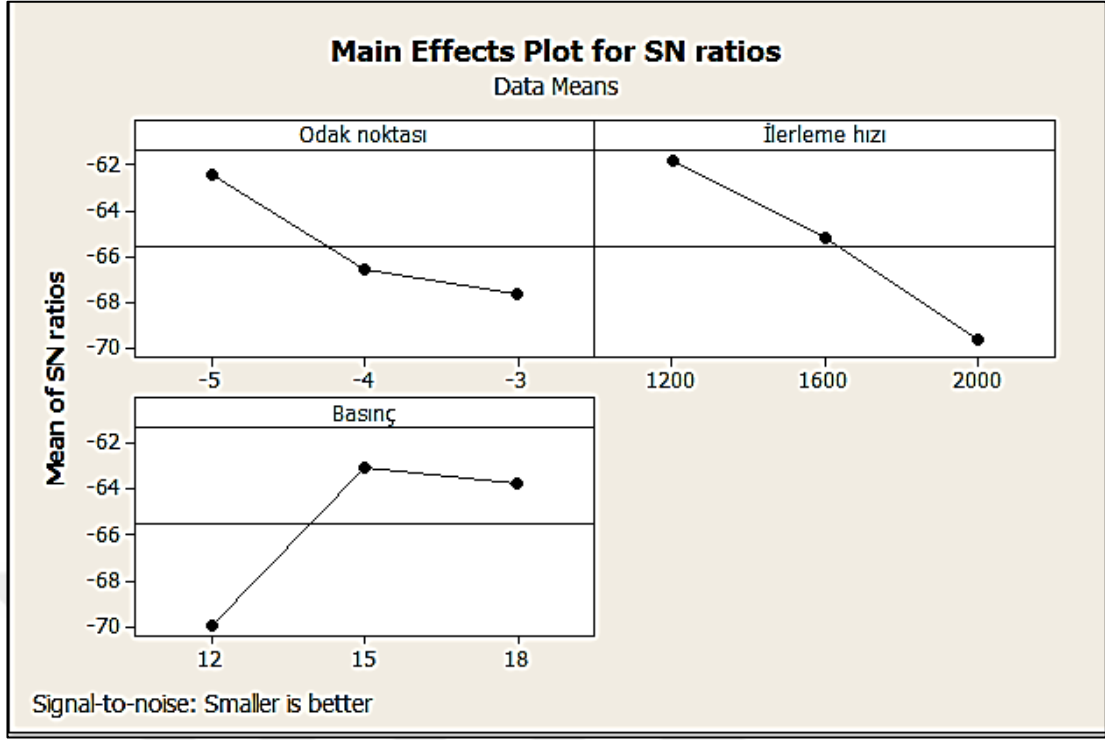
Şekil 6.7. İşleme parametrelerine bağlı çapak yüksekliğinin değişimi (-4 odak).

Grafikler ışığında bir değerlendirme yapıldığında, sabit basınçta ilerleme hızını artmasıyla birlikte çapak yükseklik değerlerindeki artış açık bir şekilde gözükmektedir. Diğer taraftan, sabit ilerleme hızında basıncın kademeli olarak yükselmesiyle çapak yükseklik değerlerinde ilk önce bir azalma, daha sonraki yükselişinde artış söz konusudur. Bu tür dalgalanmalar, çapak yüksekliği açısından belirli bir eşik değerini işaret etmektedir. Bu bağlamda, sabit ilerleme hızında basıncın 12 bar'dan 15 bar'a yükselmesiyle çapak yüksekliğinin azalması ve akabinde basıncın 15 bar'dan 18 bar'a çıkmasıyla çapak yüksekliğinin artması, 15 bar basıncın eşik değeri olduğunun işaretidir. Bu durum, literatürde var olan bir çalışma ile çapak fikir oluşturması açısından desteklenebilir [11].

Bu sonuçlar çerçevesinde en küçük çapak yüksekliği odak noktası -3 için; basınç değeri 18 bar ve ilerleme hızı 1200 mm/dak olan işleme parametrelerinde 999 µm, en büyük değer ise 18 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 4039 µm olarak tespit edilmiştir. Odak noktası -4 için en küçük çapak yüksekliği; basınç değeri 15 bar ve ilerleme hızı 1200 mm/dak olan parametrelerde 802 µm, en büyük değer ise 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 3996 µm olarak ölçülmüştür. Odak noktası -5 için en küçük çapak yüksekliği; 15 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 504 µm, en büyük değer ise 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 3401 µm olarak ölçülmüştür.

Her bir grafik incelendiğinde en küçük çapak yüksekliği; -5 odak noktasında, 15 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 504 µm, en büyük ise -3 odak noktasında, 18 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 4039 µm olarak bulunmuştur.

Ortaya çıkan bulgular ışığında, minimum çapak yüksekliği için, en uygun parametre seviyelerinin belirlenmesi noktasında Taguchi metodu kullanılmıştır. Taguchi metodunda çapak yükseklikleri için en küçük en iyi yaklaşımı hedef alınarak optimizasyon gerçekleştirilmiş ve işleme parametrelerinin etki oranları ANOVA ile belirlenmiştir.



Şekil 6.8. Çapak yüksekliği için en uygun parametre seviyeleri.

Ortaya çıkan veriler neticesinde, çapak yüksekliği için en uygun işleme parametre seviyeleri Şekil 6.5'te sunulmuştur. AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğin lazer ile delinmesinde bulunan en uygun seviyeler, odak noktası, ilerleme hızı ve basınç için sırasıyla -3, 2000 mm/dak, 12 bar olarak saptanmıştır. Ayrıca, Çizelge 6.3'te belirtilen parametrelerin çapak yüksekliği üzerindeki etki oranlarını belirlemek için %95 güven aralığında yapılan ANOVA ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.3. Çapak yüksekli için ANOVA sonuçları.

Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Kareler Ortalaması (KO)	F değeri	PCR (%)
Odak noktası	2	4979324	2489662	14,03	14,72
İlerleme hızı	2	13090751	6545376	36,89	38,71
Basınç	2	12199428	6099714	34,37	36,07
Hata	20	3549072	177454		10,50
Toplam	26	33818575			

Çizelge 6.3'te lazer ile delik delmede işleme parametrelerine bağlı olarak elde edilen çapak yükseklik değerlerinin ANOVA sonuçları değerlendirildiğinde, ilerleme hızının

%38,71 PCR ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Diğer taraftan, ilerleme hızını takip eden basıncında, %36,07 PCR ile etkin bir rol oynadığı gözükmektedir. Odak noktasının ise %14,72 PCR ile apak yüksekliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır.





## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 7.1. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, AISI 430 ferritik paslanmaz çeliğinin fiber lazer ile delinmesinde, delik kalitesi açısından önemli kriterler olan yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği üzerinde işleme parametrelerinin etkileri analiz edilmiştir. Literatür araştırmaları neticesinde en önemli işleme parametreleri olarak odak noktası, ilerleme hızı ve gaz basıncı seçilmiştir. Taguchi L<sub>27</sub> dikey dizinine göre yapılan deney tasarımına göre, lazer ile delme işlemleri sonucunda çapak yüksekliği ve yüzey pürüzlülüğü için en uygun parametre seviyeleri belirlenmiş ve varyans analizi (ANOVA) ile parametrelerin işleme çıktıları üzerindeki etki oranları tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- AISI 430 paslanmaz çeliğin lazer ile delinmesinde, basıncın yükselmesiyle yüzey pürüzlülük değerinde bir azalma tespit edilmiştir. İlerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde artış gözlemlenmiştir.
- Lazer ile delme işleminde, ilerleme hızını artmasıyla birlikte çapak yükseklik değerlerindeki açık bir şekilde artış olduğu tespit edilmiştir. Basıncın kademeli olarak yükselmesiyle çapak yüksekliğinde ilk önce azalma, daha sonraki aşamada ise bir artış saptanmıştır.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü; -4 odak noktasında, 18 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 1,25 µm, en büyük Ra ise -3 odak noktasında, 12 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 2,35 µm olarak bulunmuştur.

- En küçük çapak yüksekliği; -5 odak noktasında, 15 bar basınçta ve 1200 mm/dak ilerleme hızında 504  $\mu\text{m}$ , en büyük ise -3 odak noktasında, 18 bar basınçta ve 2000 mm/dak ilerleme hızında 4039  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.
- Bu sonuçlardan, Ra ve çapak yüksekliğine göre optimum işleme parametrelerinin seviyeleri farklı olduğu anlaşılmaktadır. Paslanmaz çeliğin lazerle delinmesinde, endüstriyel uygulamalar için daha yararlı parametrelerin belirlenmesinde çoklu yanıt optimizasyon yöntemi uygulanabilir.
- Yüzey pürüzlülüğü için en uygun parametre seviyeleri odak noktası, ilerleme hızı ve basınç için sırasıyla -4, 1200 mm/dak, 18 bar olarak bulunmuştur. ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etki oranına sahip parametre %51,70 PCR ile ilerleme hızıdır.
- Çapak yüksekliği için en uygun parametre seviyeleri odak noktası, ilerleme hızı ve basınç için sırasıyla -5, 1200 mm/dak, 15 bar olarak belirlenmiştir. Çapak yüksekliği için varyans analizi değerlendirildiğinde, ilerleme hızının %38,71 PCR ile en fazla etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

## 7.2. ÖNERİLER

- İşleme parametrelerinden olan ilerleme hızının, belirgin bir şekilde her iki işleme çıktısı (yüzey pürüzlülüğü ve çapak yüksekliği) üzerinde arttırıcı bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Buna göre, paslanmaz çeliğin lazer ile delinmesinde ilerleme hızı mutlaka optimum değerde kullanılmalıdır.
- AISI 430 paslanmaz çeliğin lazer ile delinmesinde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tahmini sonuçlar üretilebilir.
- İşleme parametreleri çerçevesinde matematiksel modellemeler geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Dubey, A., Yadava, V., “Laser beam machining-A review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **48**, 609–628 (2008).
2. Radovanovic, M., Madic, M., “Experimental investigations of CO<sub>2</sub> lazer cut quality”, *Nonconventional Technologies Review*, (2011).
3. Chen, M., Ho, Y., Hsiao, W., Wu, T., Tseng S., Huang K., “Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis”, *Optics and Lasers in Engineering*, **49** 222–228 (2011).
4. Caydas, U., Hascalik, A., “Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multiperformance characteristics”, *Optics & Laser Technology*, **40**: 987–994 (2008).
5. Rao, T., Kaul, R., Tiwari, P., Nath, A., “Inert gas cutting of titanium sheet with pulsed mode CO<sub>2</sub> laser”, *Optics and Lasers in Engineering*, **43**: 1330–1348 (2005).
6. Riveiro, A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J., “Parametric investigation of CO<sub>2</sub> laser cutting of 2024-T3 alloy”, *Journal of Materials Processing Technology*, **210**: 1138 (2010).
7. Ürgüplü M., Köksal, S., “Lazer ile kesme işlemlerinde kesim kalitesine etki eden parametreler, *Isites*, 864-874 (2015).
8. Rajesh, P., Nagaraju, U., Harinath, G., Vishnu, T., “Experimental and parametric studies of Nd:YAG laser drilling on austenitic stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **93** (1-4) 65-71 (2015).
9. Mert F., Tunç M., Sur G., “AISI 304 Çeliğinin Lazer İle Kesilmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi”, *5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Baku, 189-198 (2017).
10. Mohazab, A., Moradi, M., “Hole geometry features analysis in fiber laser percussion drilling process”, *International Journal of Advances in Mechanical & Automobile Enginerring*, **2**: (1) 18-21 (2015).

11. Wandera, C., Kujanpää, V., “Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 225: (5) (2011).
12. Wandera, C., Kujanpää, V., Salminen, A., “Laser power requirement for cutting thick-section steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 225: (5) (2011).
13. Abdel, K., Newishy, M., “Cutting of 1.2mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and cw nd:yag laser”, *Journal of Materials Processing Technology*, 168: (3) 438-447 (2005).
14. Moradi, M., Golchin, E., “Investigation on the effects of process parameters on laser percussion drilling using finite element methodology; statistical modelling and optimization”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14 464-484 (2017).
15. Wang, C., Chen, G., Luan, D., and Zhang, P., “Effect of laser power on the quality of drilled micro hole using Cu<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub> amorphous alloys foils”, *Micromachines*, 5 1061-1068 (2014).
16. Ozaki, H., Koike, Y., Kawakami, H., and Suzuki, J., “Cutting properties of austenitic stainless steel by using laser cutting process without assist gas”, *Advances in Optical Technologies*, 1-8 (2012).
17. Jarosza, K., Löschnera, P., Niesłonya, P., “Effect of cutting speed on surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel”, *International Conference on Manufacturing Engineering and Materials*, 155-162 (2016).
18. Chatterjee, S., Abhishek, K., and Mahapatra, S., “Study on surface quality of laser drilled holes: parametric optimization using harmony search algorithm”, *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 5: (4) 251-254 (2017).
19. Satpute, Y., Inamdar, D., “Parametric effect analysis on laser drilling using doe”.
20. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., Cheraghi, S.H. “CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43 351-358 (2003).
21. Gadallah, M., H., Abdu, H., M., “Modeling and optimization of laser cutting operations”, *Manufacturing Review*, 2 (20) 1-15 (2015).

22. Chen, S., “The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO<sub>2</sub> laser cutting”, *Journal of Materials Processing Technology*, 57-66 (1999).
23. Lippold, J.C., Kotecki, D.J., *John Wiley&Sons*, USA, 87, (2005).
24. Outokumpu, “Handbook of stainless steel”, *Sweeden*, (2013).
25. Karlsson, L., “Stainless steel past, present and future”, *Svetsaren*, 1 47- 52 (2004).
26. Oates, W.R., Salta, A.M., “Editors AWS”, *Ohio USA*, 621 (1998).
27. Davis, J.R., “Davis & Associates”, OH: *American Society for Metals Materials Park*, (1994).
28. Aran, A. ve Temel, M. A., “Paslanmaz çelik yassı mamuller üretimi, kullanımı, standartları, *Acar matbaacılık A.Ş.*, İstanbul, 53-54, 86-87 (2004).
29. Aydın T., “Paslanmaz çeliklerin mıg kaynağında kullanılan gazlar ve etkileri” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 30-49 (2002).
30. Euroinox, “Paslanmaz çelik”, *The European Stainless Steel Development Association*, İstanbul, Türkiye, 1-6.
31. Boardman B., Company, Deere, Center, T., “Properties and selection: irons steels and high performance alloys”, *ASM Handbook*, 673-688 (2001).
32. DPT, “SBYKP Demir-Çelik Sanayi Özel İhtisas Komisyonu Raporu”, DPT Yay. No: 2497, ÖİK Raporu No: 520, Ankara, (2000).
33. Taşkın, M., Ozan, S., AISI 430-AISI 1010 “Çelik çiftinin Cu ara tabaka kullanılarak yapılan TLP difüzyon kaynağında sıcaklığın birleştirmeye etkisinin araştırılması”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 180-185 (2004).
34. Euroinox, “Asal çelik paslanmaz-özellikleri”, *The European Stainless Steel Development Association*, İstanbul, Türkiye, 1-31 (2007).
35. <https://essner.com/capabilities/machining/> (Erişim tarihi: 10.05.2019).
36. Erdoğan Ş., “Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 29-49 (2007).

37. Süle, P., “Düşük güçlü fiber lazer diyotlu kesme sistemlerinde ışın kalite faktörünün iyileştirilmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 19-38 (2013).
38. <https://shop.monash.edu/m-ae-laser-cutting-1-of-value.html> (Erişim tarihi: 10.02.2019).
39. Kıyak, İ., “Laser safety officer”, **İlmak**, 1-13.
40. Kaçar, E., “Sanayide lazer uygulamaları güvenliği”, **İş sağlığı ve güvenliği sempozyumu**, Ankara, (2015).
41. Uzungörür M., “Inconel 718 sac malzemelerin lazer ile kesilmesinde işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 49-65 (2015).
42. Saydam A., “Çeşitli lazer parametrelerinin silikon malzeme delme sürecine etkisi” Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-35 (2015).
43. Osmanoglu, T., “AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikro yapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri”, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi**, İstanbul, 30-40 (2012).
44. [http://www.clemex.com/clemex/media/assets/pdf/HardwareEquipment/Cameras/Clemex\\_USB3\\_BW\\_CMOSIS\\_Cameras.pdf](http://www.clemex.com/clemex/media/assets/pdf/HardwareEquipment/Cameras/Clemex_USB3_BW_CMOSIS_Cameras.pdf) (Erişim tarihi: 11.05.2019).
45. <https://www.mahr.com/tr/Ürünler-ve-Hizmetler/Üretim-Metrolojisi/Ürünler/MarSurf--Mobil-Pürüzlülük-Ölçme-Üniteleri/MarSurf-M-300---Mobil-Pürüzlülük-Ölçme-Aleti/> (Erişim tarihi: 09.05.2019).
46. Akkurt, M., “Makina Elemanları Cilt II”, **Birsen Yayınevi**, İstanbul, Türkiye, (2000).
47. Bahçe, E., Kılıçkap, E., Özel, C., “Al-5005’in delinmesinde delme parametrelerinin çapak oluşumuna etkisinin araştırılması”, **2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi**, Balıkesir, 242-250 (2010).

## ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin UZUN, 1990 yılında Samsun'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini sırasıyla Samsun ve Ordu'da tamamladı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2015 yılında mezun oldu. Halen özel bir firmada Makine Mühendisi olarak çalışmaktadır. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu Yüksek Lisans Programına devam etmektedir.

### **İletişim Bilgileri:**

Adres: Sancaklı Mah. Kargalı Sok. No:47 Terme/SAMSUN

E-posta : huseyin.uzun55@hotmail.com