



**HARDOX 450 ÇELİĞİNİN LAZERLE
DELİNMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN
DELİK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

Fulya ÇIRAKOĞLU

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

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

**HARDOX 450 ÇELİĞİNİN LAZERLE DELİNMESİNDE KESME
PARAMETRELERİNİN DELİK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN
DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI**

Fulya ÇIRAKOĞLU

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

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

**KARABÜK
Temmuz 2021**

Fulya ÇIRAKOĞLU tarafından hazırlanan “HARDOX 450 ÇELİĞİNİN LAZERLE DELİNMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN DELİK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

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

Öğr. Gör. Dr. Barış ÖZLÜ
Tez 2. Danışmanı, Aksaray Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/07/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

Üye : Prof. Dr. Halil DEMİR (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun YAKA (AÜ)

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Fulya ÇIRAKOĞLU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HARDOX 450 ÇELİĞİNİN LAZERLE DELİNMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN DELİK KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE İSTATİSTİKSEL ARAŞTIRILMASI

Fulya ÇIRAKOĞLU

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Öğr. Gör. Dr. Barış ÖZLÜ

Temmuz 2021, 67 sayfa

Bu çalışmada, sert ve doymuş çeliğin en iyi örneklerinden biri olan 6 mm kalınlığında Hardox 450 çeliği kullanılmıştır. Hardox 450 çeliğinin lazerle delme işleminde kesme parametrelerinin (odak noktası, kesme hızı, gaz basıncı ve lazer gücü) yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı üzerine etkisi incelenmiştir. Lazer kesme işlemi için deney tasarımı, Taguchi'nin L_{18} ortogonal dizisine göre yapılmıştır. Deneysel kesme parametreleri olarak; iki farklı odak noktası (-1 mm ve -0,5 mm), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar), üç farklı kesme hızı (1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn) üç farklı lazer gücü (2200 W, 2400 W ve 2600 W) seçilmiştir. Taguchi yöntemine göre lazer delme işleminde kullanılan kesme parametreleri optimize edildi. Ayrıca kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile

üst ve alt delik dairesellik toleransı üzerine etkilerinin belirlenmesi için varyans (ANOVA) analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; Hardox 450 çeliğinin delinmesinde kesme hızının ve lazer gücünün artması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olur, gaz basıncının ve odak noktasının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücünün artması ile üst ve alt delik dairesellik toleransı artarken, odak noktasının azalması üst ve alt delik dairesellik toleransının azalmasına neden olmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü 0,718 µm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir. Üst ve alt delik için sırası ile en küçük boyutsal tamlık 20,069 mm ve 20,024 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olmuştur. Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı için sırası ile en etkin parametre %77,17, %51,40 ve %71,80 ile gaz basıncı olmuştur.

Anahtar Sözcükler : Hardox 450 çeliği, lazer delme, yüzey pürüzlülüğü, üst ve alt delik dairesellik toleransı, optimizasyon.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL AND STATISTICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CUTTING PARAMETERS ON HOLE QUALITY IN LASER DRILLING OF HARDOX 450 STEEL

Fulya ÇIRAKOĞLU

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Lecturer Dr. Barış ÖZLÜ

July 2021, 67 pages

In this study, 6 mm thick Hardox 450 steel, one of the best examples of hard and saturated steel, was used. The effects of cutting parameters (focal point, cutting speed, gas pressure and laser power) on top and bottom hole circularity tolerance with surface roughness were investigated in laser drilling of Hardox 450 steel. The experimental design for the laser cutting process was made according to Taguchi L₁₈ orthogonal array. As cutting parameters in experiments; two different focal points (-1 mm and -0.5 mm), three different gas pressures (0.7 bar, 0.8 bar and 0.9 bar), three different cutting speeds (1100 mm/s, 1300 mm/s and 1500 mm/s) three different laser powers (2200 W, 2400 W and 2600 W) were selected. The cutting parameters used in the laser drilling process were optimized according to the Taguchi method. In addition, variance

(ANOVA) analysis was performed to determine the effects of cutting parameters on surface roughness and tolerance of top and bottom hole circularity. As a result; While the increase in cutting speed and laser power in the drilling of Hardox 450 steel caused a decrease in surface roughness, the increase in gas pressure and focal point caused an increase in surface roughness. With the increase of gas pressure, cutting speed and laser power, the upper and lower hole circularity tolerance increased, while the decrease in the focal point caused the upper and lower hole circularity tolerance to decrease. The optimum cutting parameters for the lowest surface roughness $0,718 \mu\text{m}$ were determined as -1 mm focal point, 0.7 bar gas pressure, 1300 mm/sec cutting speed and 2600 W laser power. The optimum cutting parameters for the smallest dimensional accuracy of 20.069 mm and 20.024 mm for the upper and lower holes, respectively, were -1 mm focal point, 0.7 bar gas pressure, 1300 mm/sec cutting speed and 2200 W laser power. As a result of the variance analysis, the most effective parameter for surface roughness and upper and lower hole circularity tolerance were 77,17%, 51,40% and 71,80%, respectively, gas pressure.

Key Word : Hardox 450 steel, laser drilling, surface roughness, top and bottom hole circularity tolerance, optimization.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Halil DEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sürecinde, katkılarını esirgemeyen, örnek çalışma ahlakıyla bana çalışma arzusu veren, deney numunelerinin hazırlanmasından tez yazımı tamamlanana kadar her aşamada bana yardımcı olan ve yol gösteren, her daim ilgili ve destekleyici tavrıyla yolumu aydınlatan danışman hocam Öğr. Gör. Dr. Barış ÖZLÜ 'ye teşekkür ederim.

Numunelerin lazerle kesilmesinde desteğini esirgemeyen Kromlüks Mutfak Cihazları İmalat ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugünlere getiren maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli babam Şakir ÇIRAKOĞLU, annem Meral ÇIRAKOĞLU ve kıymetli kardeşlerim Feyza ÇIRAKOĞLU ve İrem ÇIRAKOĞLU'na bu süreçte yanımda oldukları için, tüm kalbimle onları çok sevdiğimi söyleyerek, sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
BÖLÜM 3	13
LAZER.....	13
3.1. LAZERİN TANIMI VE TARİHÇESİ.....	13
3.2. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ	15
3.3. LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	15
3.4. LAZER ÇEŞİTLERİ	16
3.4.1. Gaz Lazerler.....	17
3.4.2. Katı Lazerler	17
3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	17
3.6. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ.....	18
3.6.1. Endüstriyel Çelikler	18
3.6.2. Paslanmaz Çelikler	18
3.6.3. Alüminyum.....	19

	<u>Sayfa</u>
3.6.4. Titanyum.....	19
3.6.5. Bakır ve Pirinç	19
3.6.6. Sentetik Malzemeler	20
3.6.7. Organik Malzemeler	20
3.7. LAZER UYGULAMA ALANLARI	21
3.8. LAZERLERDE KULLANILAN KESME GAZLARI	22
3.8.1. Oksijen.....	22
3.8.2. Azot ve Argon.....	22
3.8.3. Basıncılı Hava.....	23
BÖLÜM 4	24
LAZERLE KESME VE DELME İŞLEMİ	24
4.1. LAZER IŞINI İLE KESME	24
4.1.1 Lazer ile Süblimleştirerek Kesme.....	24
4.1.2. Lazer ile Yakarak Kesme.....	25
4.1.3. Lazer ile Ergiterek Kesme	26
4.2. LAZER IŞINI İLE DELME	27
4.2.1. Lazerle Delmede Delik Özellikleri.....	27
4.2.2. Lazerle Delme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	27
4.3. KARBONDİOKSİT (CO ₂) LAZERİ	28
4.3.1. CO ₂ Lazer Tezgâhının Avantajları ve Dezavantajları.....	29
4.4. LAZER KESME PARAMETRELERİ	30
4.4.1. Kesme Hızı	31
4.4.2. Kesme Gazları	31
4.4.3. Odaklama Noktası	31
4.4.4. Lazer Gücü.....	32
4.4.5. Gaz Basıncı.....	32
4.4.6. Nozul Seçimi	32
4.4.7. Işın Merkezi Ayarı.....	33
BÖLÜM 5	34
HARDOX ÇELİKLERİ	35

	<u>Sayfa</u>
5.1. HARDOX ÇELİK TÜRLERİ	35
5.1.1. HARDOX 400 serisi.....	35
5.1.2. HARDOX 450 serisi.....	35
5.1.3. HARDOX 500 serisi.....	35
5.1.4. HARDOX 600 serisi.....	36
5.1.5. HARDOX HiTuf serisi.....	36
BÖLÜM 6	37
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME.....	37
6.2. DENEY DÜZENEGİ	37
6.3. DENEY TASARIMI	38
6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ.....	39
6.5. DELİK ÇAPLARININ ÖLÇÜMÜ	40
BÖLÜM 7	42
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR	42
7.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	42
7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ	46
7.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN VARYANS ANALİZİ	47
7.4. ÜST DELİKLER İÇİN ORTALAMA DAİRESELLİK TOLERANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	48
7.5. ÜST DELİKLER İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ	51
7.6. ÜST DELİKLER İÇİN VARYANS ANALİZİ(ANOVA)	52
7.7. ALT DELİKLER İÇİN ORTALAMA DAİRESELLİK TOLERANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ	53
7.8. ALT DELİKLER İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ	55
7.9. ALT DELİKLER İÇİN VARYANS ANALİZİ (ANOVA).....	57
BÖLÜM 8	59
SONUÇ VE ÖNERİLER	59
8.1. SONUÇLAR	59
8.2. ÖNERİLER	60

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Lazer çeşitleri	16
Şekil 4.1. Lazer-süblimleştirme kesme sistemi	25
Şekil 4.2. Delik özellikleri	27
Şekil 4.3. CO ₂ lazer tezgâhı	29
Şekil 4.4. Lazer kesme yüzey karakteristikleri	30
Şekil 5.1. Hardox aşınma levhasından imal edilmiş bir damper kasası.....	35
Şekil 6.1. Şematik deney düzeneği	38
Şekil 6.2. Delik çaplarının ölçümü	41
Şekil 7.1. -0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi	43
Şekil 7.2. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi	44
Şekil 7.3. Lazer delme deneylerinde kesme parametrelerinin S/N oranları grafiği	47
Şekil 7.4. -0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı delik çaplarındaki sapmanın değişimi.....	49
Şekil 7.5. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı delik çaplarındaki sapmanın değişimi.....	50
Şekil 7.6. Üst delik çapları için lazer delme deneylerinde S/N oranı grafiği	52
Şekil 7.7. - 0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı alt delik çaplarındaki sapmanın değişim.....	54
Şekil 7.8. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı alt delik çaplarındaki sapmanın değişim.....	55
Şekil 7.9. Alt delik çapları için lazer delme deneylerinde S/N oranı grafiği.....	57

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Lazer gelişiminin tarihçesi	14
Çizelge 3.2. Lazer türlerinin karşılaştırılması	18
Çizelge 6.1. Deneysel çalışmada kullanılan Hardox 450 çeliğinin kimyasal birleşimi	37
Çizelge 6.2. Deneysel çalışmada kullanılan Hardox 450 çeliğinin mekanik özellikleri	37
Çizelge 6.3. Lazer delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri	39
Çizelge 6.4. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri	40
Çizelge 7.1. Deneyler sonucu elde edilen veriler	42
Çizelge 7.2. Farklı kesme parametrelerinde yapılan lazer delme işleminde elde edilen Ra değerleri ve S/N oranları	46
Çizelge 7.3. Lazer delme işlemi sonucu yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablo	47
Çizelge 7.4. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi sonuçları	48
Çizelge 7.5. Farklı lazer kesme parametrelerinde yapılan lazer delme deneyleri sonucu üst delik çap değerleri ve S/N oranları	51
Çizelge 7.6. Lazer delme deneyleri sonucu üst delik çapları için S/N yanıt tablosu	52
Çizelge 7.7. Lazer delme deneylerinde üst delik çapları için varyans analizi sonuçları	53
Çizelge 7.8. Farklı lazer kesme parametrelerinde yapılan lazer delme deneyleri sonucu alt delik çap değerleri ve S/N oranları	56
Çizelge 7.9. Lazer delme deneyleri sonucu alt delik çapları için S/N yanıt tablosu	56
Çizelge 7.10. Lazer delme deneylerinde alt delik çapları için varyans analizi sonuçları	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

mm/s : Kesme hızı

µm : Mikrometre

W : Watt

kW : Kilowatt

MPa : Megapascal

°C : Santigrat derece

He : Helyum

N : Azot

C : Karbon

Mn : Mangan

B : Bor

P : Fosfor

S : Kükürt

Si : Silisyum

Cr : Krom

Ni : Nikel

Mo : Molibden

CO₂ : Karbondioksit

KISALTMALAR

CMM : Üç Boyutlu Kordinat Ölçüm Cihazı

ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

CNC : Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişmiş işleme yöntemleri arasında lazer kesim, çok farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan en yaygın termal bazlı işleme yöntemlerinden biri olarak metal endüstrisinde yerini almaktadır. Lazer işleme teknolojisi, kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, düşük maliyet, yüksek parça kalitesi, yüksek işleme hızı ve daha az parça fitesi nedeniyle imalat endüstrisinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bununla birlikte lazerle işleme sırasında, kesme bölgesinde iş parçası yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde aşırı termal gerilmelerin oluşması parça kalitesinin düşmesine neden olmaktadır [1]. Bu özelliklere ilaveten, temassız olarak kesilmesi zor malzemeler, kırılğan malzemeler, iletken ve iletken olmayan malzemeler, yumuşak ve ince malzemeler gibi gelişmiş mühendislik malzemelerin işlenmesi için kullanılmaktadır [2]. Lazer ışını ile kesme, odaklanmış bir lazer ışını iş parçasının yüzeyi üzerinde uygun tarama hızıyla hareket ettirilerek yürütülen termal enerji bazlı bir kesme işlemidir [3]. Lazer kesme işlemlerinde O₂ (oksijen) ve N (azot) gibi farklı türlerde yardımcı gazlar kullanılmaktadır. Belirli bir karışım yüzdesi ile uygun bir gaz tipinin seçilmesi ve kesme hızının artırılması kesme maliyetini en aza indirmek için önemlidir [4]. Endüstrilerde talaşlı imalat için kullanılan çeşitli lazer türleri arasında, CO₂ ve Nd:YAG lazerleri en köklü olanlardır [5]. CO₂ lazeri karbondioksit, azot ve helyum gaz karışımlarından oluşturulmuş bir lazer türüdür. CO₂ lazeri, geliştirilen ilk lazer türlerinden olup, düşük maliyeti nedeniyle günümüzde de yaygın olarak kullanılan lazer tipidir. CO₂ lazer devamlı dalga olarak en yüksek güce ve verime sahiptir [6]. Lazer kesme işleminin kalitesi kesilen yüzeyin geometrisi, pürüzlülüğü, morfolojisi ve metalürjik özellikleri incelenerek belirlenmektedir. Bu kalite karakteristiklerinin istenilen düzeyde olması ise kesilecek malzeme özelliklerine uygun olarak seçilen kesme parametrelerine bağlıdır [5]. Aşınma endüstriyel piyasada ve mühendislik

uygulamalarında en çok karşılaşılan problemlerdendir. Hardox, aşınma direnci konu olduğu zaman ihtiyaç duyulan en üst düzeydeki beklentilere yanıt verebilen bir aşınma levhasıdır. Hardox levhasının, diğer yüksek mukavemetli yapı levhalarına kıyasla 4-5 kat daha sert olmasının yanı sıra mükemmel kaynak edilebilme ve işlenebilme özellikleri bu malzeme ile çalışmayı kolaylaştırmaktadır [7]. Malzeme yapısında sağlanan homojen dağılımlı yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve tokluğun sağladığı avantajlar birçok uygulama için bu malzemeyi en ideal tercih haline getirmiştir. Aşınma şiddetini etkileyen faktörlere bakıldığında; aşınmaya maruz kalan sistemin elemanları, malzeme cinsi, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, kimyasal içerik, uygulanan ısıl işlemler, çevre, çalışma ortamı, elastik modülü, aşındırıcının tane boyutu ve şekli olduğu görülmektedir [7]. Sertlik, malzeme seçiminde dikkate alınması gereken parametrelerin en önemlilerinden bir tanesidir [8]. Malzemelerin sertlik değerleri yüksek ise aşınma dirençlerinin de yüksek değerlerde olduğu bilinmektedir. Aşınmanın malzemeler üzerindeki olumsuz durumların giderilmesi için aşınmaya dayanıklı malzemeler geliştirilmektedir [8]. Bu malzemelerden bir tanesinde Hardox çelikleri serisidir. Özellikle Hardox 450 çeliği, piyasadaki yüksek dayanımlı diğer çeliklere kıyasla, en az 5 kat daha uzun ömürlü olduğu ve bu özelliğinden dolayı ise kepçe ve damperli kamyonların kasalarının üretiminde kullanılmaktadır [8]. Hardox tokluğu, düşük sıcaklıklardaki aşırı zorlanmalar gibi güç şartlar altında bile çok yüksek olması sıradan bir aşınma levhası olmadığına göstergesidir. Bu durum özellikle Hardox'u darbelere karşı güçlü kılmaktadır [8].

Yapılan bu çalışmada sektöründe oldukça geniş bir kullanım alanı bulunan Hardox 450 çeliğinin lazer ile delinmesinde işleme parametrelerinin (kesme hızı, basınç, odak noktası, lazer gücü) yüzey pürüzlülüğü, üst ve alt delik dairesellik toleransına etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile bu malzemenin CO₂ lazer kullanan lazer kesim tezgahlarında daha hızlı, daha yüksek verimlilik ve daha iyi yüzey kalitesi ile daha ekonomik maliyetlerde delinmesi için ideal işleme parametreleri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Dubey ve Yadava tarafından yapılan çalışmada, silikon alaşımlı sac malzemenin lazer kesme işleminde kerf genişliği ve malzeme kaldırma oranına etki eden lazer kesme parametrelerinin optimizasyonu için birleşik Taguchi Method ve Cevap Yüzey Metodu kullanmıştır. Lazer kesme parametresi olarak gaz basıncı, darbe genişliği, kesme hızı ve darbenin frekansını seçmişlerdir. Sonuç olarak Taguchi Method kullanılarak kerf genişliği ve malzeme kaldırma oranı için sırasıyla 0.3733 mm ve 124.1095 mg/dak ve hibrit yaklaşımda bu değerler sırasıyla 0.3267 mm ve 169.1667 mg/dak ile optimum değerlere ulaşmışlardır. Kerf genişliği ve malzeme kaldırma oranı için geliştirilen RSM yeterli bulunmuş ve doğrusal parametrelerin her iki model için de önemli olduğunu belirtmişlerdir. Darbe genişliği, kesme hızı, darbe genişliğinin karesi ve darbe frekansının birbiri ile etkileşimi ve darbe frekansı ile kesme hızının etkileşimi KW için önemli faktörlerin olduğunu tespit etmişlerdir. Malzeme kaldırma oranı kesme hızı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızının kare etkisinden önemli ölçüde etkilendiğini bulmuşlardır [9].

Rajaram ve arkadaşları bu çalışmada 4130 çelik malzemesi kullanmışlardır. Numuneler CO₂ lazer ile kesilmiştir. Güç ve ilerleme hızlarının kesme işlemine olan etkileri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve ITAB bölgesi incelenmiştir. İlerleme hızından en çok yüzey pürüzlülüğü ve çizgi sıklığı etkilenmiştir. Düşük güç seviyelerinde, en küçük çentik genişliği ve ITAB elde edilir ve ilerleme hızının etkisi orta düzeydedir. Düşük ilerleme oranları, iyi yüzey pürüzlülüğü ve düşük çizgi frekansı vermiştir [10].

Ürgüplü ve Köksal bu çalışmalarında, endüstriyel malzeme kesme işlemlerinde kullanılan lazer sistemleri ve işlem parametrelerinin kesme ve ürün kalitesine etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda lazer ile kesimde istenilen yüksek hassasiyet,

minimum pürüzlük, dar kesim izi aralığı gibi özelliklerin sağlanabilmesi için parametrelerin optimum değerlere ayarlanması gerekmektedir [11].

Uslan, bu çalışmada çentik genişliğine lazer gücü ve kesme hızı varyasyonlarının etkisi incelenmiştir. Kesme işlemi sırasında çentik boyutunu ve varyasyonunu ölçmek için bir deney yapılmıştır. İş parçası yüzeyindeki güç yoğunluğunun, çentik genişliği boyutunu önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur. Güç yoğunluğundaki varyasyon, kesme sırasında çentik boyutunda, daha düşük yoğunluklarda daha belirgin olan önemli varyasyona neden olmuştur [12].

Tunç ve arkadaşları çalışmalarında, CO₂ lazer tezgâhlarında seçilen kesme parametre değerlerinin AISI 304 kalite paslanmaz çelik sacların kesim işlemine etkilerini incelemişlerdir. Deneyde güç, hız, focus mesafesi, yardımcı gaz basıncı gibi kesme parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerine olan tesirleri değerlendirilmiştir. Sonuçta lazer kesim sonrası oluşan yüzeydeki yüzey pürüzlülük değerinin azot (N₂) yardımcı gazı kullanılarak artan basınç, azalan kesim gücü ve ilerleme miktarı ile düştüğü sonucuna varılmıştır. Yüzey kalitesi üzerinde focus mesafesinin etkili olduğu ve iş parçası malzemesine uygun ideal focus mesafesinin belirlenmesi gerektiği ortaya konmuştur. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için 1700 W güç değerinde, azot gazı ile kesimde en ideal focus mesafesinin 0 mm olduğu bulunmuştur [13].

Lamikiz ve arkadaşları çalışmasında yüksek mukavemetli çeliğin (AHSS) lazer kesimi için optimum çalışma alanlarını ve kesme koşullarını göstermektedir. Sac metal kesimini en çok etkileyen parametreler incelenmiş ve sonuçlar 1 mm'den fazla ve az kalınlıkta iki büyük gruba ayrılmıştır. Sonuçlar, en ince ve en kalın levhalar arasında çok farklı davranışlar sergilerken, malzemenin etkisine bağlı olarak kesme parametrelerinin değişimi daha az ilgilidir. Son olarak, lazer ışını için en iyi pozisyonun levhanın altında olduğu görülmüştür [14].

Yılbaş ve arkadaşları bu çalışmalarında Ti-6Al-4V alaşımı, çelik 304, Inconel 625 ve alumina ve alümina dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin lazer kesimi, kesilen bölüm b boyunca çentik genişliği boyut değişimini değerlendirmişlerdir. Lazer çıktı gücünün

ve lazer kesme hızının çentik genişliği boyut değişimi üzerindeki etkisi, taramalı elektron ve optik mikroskoplar dahil analitik araçlar kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuç olarak çentik genişliği boyut değişimi, artan lazer çıktı gücü ile artar. Ancak bu davranış, lazer kesim hızının artmasıyla tersine döner. Kullanım ömrü değerlendirmesi, lazer kesim için malzeme seçiminin çevrenin korunması açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır [15].

Zaied ve arkadaşları, bu çalışmada deney malzemesi olarak düşük karbonlu (S235) çelik kullanmışlardır. Kesme işleminde CO₂ lazer kullanılmıştır. Kesme hızının ve gücün kesmeye olan etkisi incelenmiştir. Mevcut çalışma, farklı test koşullarında lazer kesim işlemlerinden sonra yüzey kalitesini (pürüzlülüğü) analiz etmekte ve ayrıca yüzey pürüzlülük değerlerini basit bir şekilde tahmin etmektedir. Sonuç olarak kesme hızının yüzey kalitesine büyük bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [16].

Davim ve arkadaşları çalışmalarında, işleme parametrelerinin (lazer gücü ve kesme hızı) çeşitli polimerik malzemeler için kesim kalitesi altındaki etkisini değerlendirmek için bir ön çalışma sunmaktadır. Numuneler CO₂ lazer ile farklı kalınlıklarda kesilmiştir. Amaç, kesimin kalitesini çapak varlığı ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) boyutunu değerlendirmektir. İncelenen polimerlerin / kompozitlerin lazer kesim işlenebilirliği şu şekildedir: PMMA çok yüksek, PC yüksek, PP yüksek / orta ve güçlendirilmiş termoset plastikler daha düşüktür [17].

Pandey ve Dubey yaptıkları çalışmada, 1.4 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V alaşımli levhanın lazer kesiminde hibrit deney tasarımı ve genetik algoritma yaklaşımını eş zamanlı olarak kullanarak kerf koniği ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden lazer kesme parametrelerini optimize etmişlerdir. Deneyleerin gerçekleştirilmesinde gaz basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızı lazer kesme parametreleri olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda geliştirilen regresyon modelinde kerf koniği ve yüzey pürüzlülüğünün tahminini sırası ile %90 ve %95 güven seviyesinde bulunmuştur. Deneyleerde en etkin parametrenin darbe frekansının olduğunu, bununla birlikte yüzey pürüzlülüğü için kesme hızı, kerf koniği için darbe genişliği ve gaz basıncı etkin parametre olduğu belirlenmiştir. Önerilen optimizasyon tekniği ile Ti-

6Al-4V levhanın lazer kesme işleminde kalite özelliklerinin eşzamanlı iyileştirilmesinde kullanılabileceğini ifade etmişlerdir [18].

Arcan çalışmasında, termik kesme yöntemlerinden olan lazer ile kesme yönteminde, lazer ışını elde edilme yöntemleri, kesme yönteminde kullanılan CO₂ lazer sistemi yapısı, lazer ışını ile kesme çeşitleri ve bunların etkilerinin neler olduğu hakkında çalışmıştır. CO₂ lazeri kesme yönteminde kesme işlemini etkileyen parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler; lazer ışını odak noktası, kesme hızı, kesme gazı basıncıdır. Bu parametrelerin değiştirilmesi ile elde edilen numuneler kesim yüzeyleri, içyapıları ve sertlikleri bakımlarından karşılaştırılarak, parametrelerdeki değişimlerin etkileri analiz edilmiştir [19].

Salem ve arkadaşları mevcut araştırmada, 1.2 mm kalınlığında ultra düşük karbonlu çelik saclar kullanmışlardır. Nd: YAG lazer kullanılmıştır. Lazer kesim parametreleri gaz basıncı, lazer gücü ve tarama hızıdır. Sonuçlar, ultra düşük karbonlu çelik ince saclarda, 1100–1500 mm / dak lazer tarama hızında, 5 bar gaz basıncı ve yardımcı bir O₂ altında minimum 337 W ısı girdisinde iyi kalitede kesimlerin üretilebileceğini ortaya koymuştur [20].

Choudhury ve arkadaşları çalışmalarında polipropilen (PP), polikarbonat (PC) ve polimetil metakrilat (PMMA) olmak üzere üç polimerik malzeme kullanmışlardır. Kesim sırasında CO₂ lazer kullanılmıştır. Lazer gücü, kesme hızı ve basınçlı hava basıncının kesim kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, PMMA'nın daha az ITAB'a sahip olduğu, ardından PC ve PP'nin izlediği görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü için PMMA, PP ve PC'den daha iyi kesme kenarı yüzey kalitesine sahiptir [21].

Durukan ve arkadaşları çalışmalarında, dört ve altı mm değerinde kalınlığı olan paslanmaz AISI 304 çelik malzemeler üzerinde belli ölçülerde, farklı üçgen, kare ve dairesel geometrilerde parçaları farklı kesme şartları altında karbondioksit lazer kesim makinesi ile işlemişlerdir. Çalışmada kesme parametrelerinin boyutsal doğruluğa olan etkilerini incelemişlerdir. Değişkenlerden, bağımsız değişkenler olarak lazer gücü,

ilerleme hızı, odak noktası mesafesi ve gaz basıncı parametreleri seçilmiştir. Kesilen parçalarda, boyutsal doğruluğa etkisi en yüksek parametreler sırasıyla; lazer gücü, ilerleme hızı, ve odak noktası mesafesi parametreleri olmuştur [22].

Khaled bu çalışmada, CO₂ gazı lazer sistemi HSLA çeliğinin kesilmesi için kullanılmıştır. CO₂ lazerle sac-metal kesimiyle iyi kalite, verimlilik, doğruluk, işlenmiş yüzeylerin kalitesinde artış, malzeme ve enerji tüketiminde ise tasarruf sağladığı gözlenmiştir. Lazer kesim, yüksek kalite ve daha düzgün kesim yüzeyi nedeniyle bilinen diğer kesme işlemlerine göre avantajlara sahiptir [23].

Eltawhni ve arkadaşları bu çalışmada AISI316L paslanmaz çeliğin CO₂ lazer ile kesilmesi incelenmiştir. İşleme parametresi olarak lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı, nozul çapı ve odak noktası kullanılmıştır. Bu çalışmanın amacı, üst çentik, alt çentik, aralarındaki oran, kesim kesiti pürüzlülüğü ve işletme maliyeti gibi son kalite parametrelerini yukarıda belirtilen işlem parametreleriyle ilişkilendirmektir [6].

Kulenovic ve arkadaşları tungsten alaşımının lazer kesimi ele alınmış ve kesme parametrelerinin ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) boyutu, çentik genişliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kesme parametreleri lazer gücü, kesme hızı ve nitrojen yardımcı gaz basıncını içerir. Sonuçlar tungsten alaşımlı ince levhaların lazerle kesilmesinde, 1000 mm / dak kesme hızında ve 2000 W lazer gücünde nitrojen yardımcı gaz basıncı altında iyi kalitede kesimler yapılabileceğini göstermektedir [24].

Kurt ve arkadaşları çalışmasında, CO₂ lazer kesim proses parametrelerinin (gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücü) mühendislik plastiği (PTFE ve POM) malzemelerin boyutsal doğruluğu ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Örneklerin kesilen yüzey profili optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Güç, ilerleme hızı ve basınç değişken parametre olarak kabul edilmiştir. Malzemeler eşit çevre uzunluğunda seçilmiştir ve geometric olarak kare, üçgen ve daire kesitli olarak kesme uygulanmıştır. Kesilen parçaların boyutları ölçülmüştür. Değişkenli regresyon analizi ile boyut hesabı yapabilen denklemler oluşturulmuş ve varyans analizi ile değişken parametrelerin malzeme boyutu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney

sonucunda PTFE ve POM malzemelerin lazer ile kesimi için en uygun değerler belirlenmiştir [25].

Krzysztof Jarosz ve arkadaşları çalışmasında, AISI316L paslanmaz çeliğin lazerle kesilmesinde kesme hızının ısıdan etkilenen bölge (HAZ) ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Test numuneleri farklı kesme hızlarında kesilirken, diğer işlem parametreleri sabit kalmıştır. Her test numunesinin yüzey pürüzlülüğü, kesme derinliği boyunca birkaç yerde ölçülmüştür. Kesme hızının yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölgenin genişliği ve makro varlığı üzerinde gözle görülür bir etkisi vardır. Kesme hızının düşmesiyle birlikte ITAB genişliği de artar ve belirli bir eşiğin altında (% 50'den az önerilen maksimum kesme hızı değeri) kesim yüzeyinin alt kısmı gözle görülür şekilde hasar görür. Son kullanıcının çok iyi yüzey pürüzlülüğüne ihtiyacı yoksa veya yüzey daha fazla işlemeye tabi tutulacaksa, araştırılan en yüksek kesme hızları kullanılmalıdır. Yüzey pürüzlülüğü daha önemliyse ve ITAB, ikincil husus, daha düşük bir kesme hızı uygulanabilir [26].

Tanrıverdi çalışmasında, otomotiv sektörünün en yoğun kullanılan malzemelerinden biri olan, DIN EN 10 025 – 94 kalitesinde sac malzemeleri lazer ile kesmiştir. Çalışmada, lazer güç seviyesi, kesme gazı ve kesme hızı parametrelerinin kesme kalitesine olan etkilerini incelemiştir. Çalışma çıktılarına göre, parametrelerin değiştirilmesi ile, malzeme mikroyapısında ciddi bir değişimin olmadığını ancak yüzey kalitesinde büyük farklılıkların olduğunu belirtmiştir. Uygun parametrelerle, kesme işleminde daha iyi yüzey kalitesinin elde edilebileceğini belirtmiştir [27].

Ghany ve arkadaşları çalışmasında, darbeli ve CW Nd: YAG lazer ışını ve yardımcı gazlar olarak nitrojen veya oksijeni her biri ayrı ayrı kullanarak 1,2 mm östenitik paslanmaz çelik saclar için optimum lazer kesim parametrelerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Lazer kesim kalitesinin temel olarak lazer gücüne, darbe frekansına, kesim hızına ve odak konumuna bağlı olduğu gösterilmiştir. Frekansı ve kesme hızını artırmak, çentik genişliğini ve kesme yüzeyinin pürüzlülüğünü azaltırken, güç ve gaz basıncını arttırırken, çentik genişliğini ve pürüzlülüğü arttırmıştır. Oksijenle karşılaştırıldığında nitrojen, ekonomik olduğu kanıtlanmasa da, daha küçük çentikli daha parlak ve daha pürüzsüz kesim yüzeyi üretmiştir [28].

Al-Qaisy çalışmasında, boru hattı yapımında yüksek yoğunluklu polietilen malzemelerin avantajlarından yararlanmak amacıyla, borularda farklı geometriye sahip delikler açılmış ve incelemesi yapılmıştır. Yüksek yoğunluklu polietilenin verimliliğini ve performansını incelemek için modern kesme yöntemlerinden biri olan lazer kesme yöntemi kullanılmıştır. Bir CO₂ lazer makinesi ile hava, azot (N₂) ve oksijen (O₂) gibi üç farklı gaz türü kullanılarak piyasada kullanılan yüksek yoğunluklu polietilen borular kesilmiş olup, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), yüzey pürüzlülüğü, çentik genişliği ve kesme kalitesi detaylıca incelenmiştir. En yüksek kesimle ilgili olarak, hız, kesme kalitesinin geliştirmesi 100 mm/dak, 5mm HDPE boru kalınlığı için, çentik genişliği, ITAB, pürüzlülük, dikeylik ve çizgi frekansı en iyi şekilde gözlenmiştir. CO₂ lazer kesim kullanarak boru numunesinin kalınlığında deforme olmadığı tespit edilmiştir [29].

El-Taweel ve arkadaşları çalışmalarında, bir CO₂ lazerin Kevlar-49 kompozit malzemeler üzerinde kesme performansı incelenmiştir. Lazer gücü, kesme hızı, malzeme kalınlığı, yardımcı gaz basıncı ve lazer modu gibi kesim parametrelerinin kalitesi, yani çentik genişliği, çapak yüksekliği ve eğim üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sonuçlar, lazer gücünün kesim parametrelerinin kalitesini etkileyen en önemli parametre olduğunu gösterdi. Kesme parametrelerinin optimum kombinasyonu, çentik genişliğini, çapak yüksekliğini ve kesme eğimini sırasıyla 0.103 mm, 0.101 mm ve 2.06 ° 'ye düşürdü. Optimum ayarlara sahip deneysel sonuçlar ile çentik genişliği, çapak yüksekliği ve kesme eğimi için tahmin edilen değerler arasındaki hata sırasıyla % 2,9, % 7,92 ve % 6,3 arasındadır [30].

Zhou ve arkadaşları çalışmasında plastik, ahşap, yonga levha ve kauçuk gibi malzemeler çeşitli lazer gücü seviyeleri ve farklı iş parçası kesme hızları ile kesilmiştir. Kesme derinliğini malzeme özellikleri ve kesme hızı açısından tahmin eden teorik bir model ile tanıtılmıştır. Deneysel kesim sonuçları teorik tahminlerle karşılaştırıldı. Teorik modeli iyileştirmek için analize iki düzeltme parametresi eklenmiştir. Analiz, imalat endüstrisinin metal olmayan malzemeleri kesmek veya markalamak için uygun bir lazer sistemi seçmesine yardımcı olacaktır [31].

Madic ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 2 mm kalınlığındaki DIN S355J2G3 sac malzeme CO₂ lazer kesiminde yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Deneylede işleme parametreleri olarak kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncı seçilmiştir. Deneyle tasarımı Taguchi'nin L25 dikey dizisine göre tasarlanmış ve deneyleler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kesme hızının ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreler olduğu, lazer gücünün etkisinin ise yüzey pürüzlülüğüne etkisinin çok daha az olduğu belirlenmiştir [32].

Patel ve Patel Hardox 400 malzemesi ile süreç parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Deneyle planlarında kesme güçleri 100 W ile 2000 W arasında değişen ve kesme hızları 200-600 mm/dak arasında değerler kullanmışlardır. Sonuç grafikleri yayında sunulmakla birlikte herhangi bir modelleme çalışması yapılmamıştır [33].

Uzungörür bu çalışmasında havacılık sektöründe de yaygın kullanıma sahip Inconel 718 malzemesinin farklı parametrelerde CO₂ lazer ile kesilmesi sonrasında ortaya çıkan kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü ve kesme bölgesinin mikroyapısı incelemiştir. Kesme sırasında lazer gaz basıncının ve lazer kesme gücünün sabit olduğu, kesme gazı basıncının ve ilerleme hızının değiştiği parametreler seçilmiş ve kullanılmıştır. Çalışmanın çıktılarında, Inconel 718 malzemesi için en uygun kesme parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. En düşük basınç değeri olan 0,8 bar kesme gazı basıncında yapılan kesme işleminde ortalama kerf genişliği değerlerinin 1,2 bar ve 1,6 bar kesme gazı basıncında yapılan kesme işlemlerine göre düşük olduğu belirlenmiştir. 1,6 bar kesme gazı basıncı ve 6 m/dak 'lık kesme hızında en düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra=2,8 µm) değerleri elde edilmiştir [34].

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

Noor ve arkadaşları bu çalışmasında akrilik levhaları lazer ışını kesme (LBC) ile kesilmiştir. Kesme hızının, malzeme kalınlığının, uç boşluğunun ve gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün uç mesafesi ve ardından güç gereksinimi, kesme hızı ve malzeme kalınlığından önemli ölçüde etkilendiği bulunmuştur. Düşük güç kullanıldığında yüzey pürüzlülüğü artar, uç mesafesi ve malzeme kalınlığı. Düşük kesme hızı, yüksek güç, uç mesafesi ve malzeme mesafesinin birleşimi ince yüzey pürüzlülüğü üretir. Mikroyapıda yanma, erime ve dalgalı yüzey gibi bazı kusurlar bulunmuştur [35].

Kotadiya ve arkadaşları cevap yüzeyi metodu kullanarak lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncının kesilen malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve kesim izi (kerf) genişliğine olan etkisini incelemiş ve en etkili parametrenin lazer gücü olduğunu belirlemişlerdir [36].

Choudhury ve Shirley çalışmalarında polimetil metakrilat, polipropilin ve polikarbonat olmak üzere üç farklı malzeme üzerinde kesim kalitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi hedeflemişlerdir. Sonuçlar incelendiğinde polimetil metakrilatta oluşan ısıdan etkilenen bölgenin diğer iki 5 malzemeye göre daha küçük olduğu gözlemlenmiş ve en iyi yüzey kalitesinin bu malzemede elde edildiği belirtilmiştir [21].

Caiazzo ve arkadaşları tarafından 2 mm'den 10 mm'ye kadar farklı kalınlıklardaki üç termoplastik malzemenin (polietilen, polipropilin ve polikarbonat) CO₂ lazer ile kesme süreci deneylerle araştırılmıştır. Araştırılan süreç parametreleri: Lazer gücü, kesme hızı aralığı, odak lensinin tipi, koruyucu gazın basınç ve akışı ve numune kalınlığıdır. Bunun dışında yüzey pürüzünün alt ve üst değerleri, ergimiş bölgenin enine kesiti ve kenarlardaki yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür. Lazer ile işlemeye uygunluk açısından PC "uygun", PP "orta seviyede uygun" ve PE ise "uygun değil" şeklinde sıralanmıştır [37].

Li ve arkadaşları tarafından hazırlanan çalışmada mikroçip imalatında Taguchi matris metodu kullanılarak optimal lazer kesim parametreleri elde edilmiştir. Lazer gücü, lazer frekansı ve kesme hızı gibi çeşitli parametrelerin lazerle kesme kalitesine etkisi

araştırılmıştır. Lazer kesim kalitesine etki eden parametreler şu sırada verilmiştir: Lazer frekansı, kesme hızı ve lazer gücü [38].

Tahir ve arkadaşları tarafından günümüzde oldukça sık kullanılmaya başlanan metal dışı malzemelerin Nd: YAG lazer ile kesimi incelenmiştir. Çalışmanın ana amacı Nd: YAG lazer ışın gücünün çalışılan parçanın tarama hızına olan etkisidir. Deney sonuçları giriş enerjisi ile kesme derinliği arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Hızın 30 mm/s'den daha yüksek olduğu yerlerde kesme derinliği hızdan etkilenmemektedir. Lazer gücünün yükseltilmesi ise kesme derinliğini arttırmaktadır. Deneysel sonuçlar teorik sonuçlarla da uyumaktadır. Çalışmada verilen sonuçlar endüstride metal olmayan malzemelerin kesme, oyma, kırıma, çizme işlemleri için uygun lazer seçiminde rehber olabilir [39].

BÖLÜM 3

LAZER

3.1. LAZERİN TANIMI VE TARİHÇESİ

Gelişmiş işleme yöntemleri arasında lazer kesim, çok farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan en yaygın termal bazlı işleme yöntemlerinden biri olarak metal endüstrisinde yerini almaktadır. Lazer işleme teknolojisi, kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, düşük maliyet, yüksek parça kalitesi, yüksek işleme hızı ve daha az parça firesi nedeniyle imalat endüstrisinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Bilim ve Mühendislik tarihinde lazerin gelişimi heyecan verici bir bölümdür. Alışılmamış çeşitlilikteki alanlarda kullanılan cihazların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Lazer tarihine 1917, Albert Einstein ile başlanabilir. Einstein teorik olarak uyarılmış ışınım kavramını geliştirmiştir. Uyarılmış ışınım kavramı lazerde kullanılan bir fenomendir. Uyarılmış ışınım ışığın yükseltilmesini sağlayıp, yüksek yoğunluktaki lazer ışığının elde edilmesini sağlar. Uyarılmış ışınım prosesinin esas doğası Einstein tarafından teorik olarak açıklanmıştır.[40]

Çizelge 3.1. Lazer gelişiminin tarihçesi [41].

LAZER GELİŞİMİNİN TARİHÇESİ		
Tarih	Adı	Başarılan
1916	Albert Einstein	Işığın yayılma teorisi. Uyarılmış ışım kavramı.
1928	Rudolph W Landenburg	Uyarılmış ışımın varlığının kanıtlanması ve negatif soğurma.
1940	Valentin A Fabrikant	Sayı yoğunluğu tersiniminin olma olasılığı.

Çizelge 3.1. (devam ediyor).

1947	Willis E Lamb R C Retherford	Hidrojen spektrumunda indüklenmiş ışımaya şüphesi. Uyarılmış ışımaya ilk gösterimi.
1951	Charles H Townes	Kolombiya üniversitesinde MAZER (Microwave Amplification of Stimulated Emission of Radiation) keşfi- Uyarılmış ışımaya dayanan ilk alet ile 1964 Nobel ödülünü kazandı.
1951	Joseph Weber	Maryland üniversitesinde MAZER bağımsız olarak keşfedildi.
1951	Alexander Prokhorov Nikolai G Basov	Moskova'da Lebedev laboratuvarlarında MAZER bağımsız olarak keşfedildi. 1964 Nobel ödülünü kazandı.
1954	Robert H Dicke	"Optik Bomba" patenti. Atımlı sayı yoğunluğu tersinimine dayanan süper-ışımaya ve "Moleküler Kuvvetlenme ve Üretim Sistemi" için parçalı Fabry-Perot rezonans çemberi.
1956	Nicolas Bloembergen	Harvard Üniversitesinde üç-seviyeli katı hal MAZER tasarımı.
1957	Gordon Gould	Bir LAZER tanımlayan ilk doküman. 1970'lerde patent şartlarında yaratıldı.
1958	Arthur L Schawlow Charles H Townes	"Optik MAZER"i tanımlayan ilk ayrıntılı makale. Kolombiya üniversitesinde yapılan ilk lazer keşfi ile yaratıldı.
1960	Arthur L Schawlow Charles H Townes	LAZER patent No. 2,929,922.
1960	Theodore Maiman	Yakut (ruby) kristali ile yapılan ilk çalışan LAZER'in keşfi. 16 Mayıs 1960, Hughes Araştırma Laboratuvarları.
1960	Peter P Sorokin Mirek Stevenson	İlk Uranyum LAZER – Yapılan lazerlerin ikincisi. Kasım 1960 IBM Laboratuvarları.
1961	A G Fox and T Li	Bell Laboratuvarlarında optik rezonatörlerin teorik analizleri.
1961	Ali Javan William Bennet Jr. Donald Herriot	Bell Laboratuvarlarında Helyum Neon (HeNe) LAZER'in keşfi.
1962	Robert Hall	General Elektrik Laboratuvarlarında yarı-iletken LAZER'in keşfi.
1964	J E Geusic H M Markos L G Van Uiteit	Bell Laboratuvarlarında ilk çalışan Nd: YAG LAZER'in keşfi.
1964	Kumar N Patel	Bell Laboratuvarlarında CO ₂ LAZER'in keşfi.
1964	William Bridges	Hughes Laboratuvarlarında Argon İyon LAZER'in keşfi.
1965	George Pimentel J V V Kasper	Kaliforniya Üniversitesi Berkley'de ilk kimyasal LAZER
1966	William Silfvast Grant Fowles and Hopkins	Utah Üniversitesinde ilk metal buhar LAZER-Zn/Cd
1966	Peter Sorokin, John Lankard	IBM Laboratuvarlarında ilk boya lazer etkisinin gözlenmesi.
1969	G M Delco	Otomobil uygulamaları için üçlü lazerlerin ilk endüstriyel donanım.
1970	Nikolai Basov's Group	Moskova Lebedev Laboratuvarlarında Xenon (Xe) ile yapılan ilk Excimer LAZER.

Çizelge 3.1. (devam ediyor).

1974	J J Ewing and Charles Brau	Avco Everet Laboratuvarlarında ilk nadir gaz halojenür excimer.
1977	John M J Madey's Group	Stanford Üniversitesinde ilk serbest elektron lazeri.
1980	Geoffrey Pert's Group	İngilterede Hull Üniversitesinde X-ışını lazer etkisinin ilk raporu.
1981	Arthur Schawlow Nicolas Bloembergen	Lineer olmayan optik ve spektroskopide yapılan çalışma için Nobel fizik ödülü.
1984	Dennis Matthew's Group	Lawrence Livermore Laboratuvarlarında X-ışını lazer gözleendiği ilk olarak rapor edildi.

3.2. LAZER IŞIĞININ ÖZELLİKLERİ

Lazer ışığı diğer ışık kaynakları ile kıyaslandığında, çok yoğun ve şiddetlidir. Bilinen ışık kaynaklarının sağladığı ışığın ışınları her yöne dağılım gösterirken, lazer ışını dağılmaz ve odaklanabilir bir yapıdadır. Lazer ışığının sapma toleransı oldukça azdır [40].

Lazer ışınlarının dalga boyları tektir. Bu nedenle, monokromatik özelliğe sahiptirler. Lazer ışını, tek renkli ve aynı faza sahip paralel dalgalar halinde yayılan, genliği yüksek bir ışık demetine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle lazer ışını ile yüksek enerjilerde çok hassas işlemler yapılabilir [40].

3.3. LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

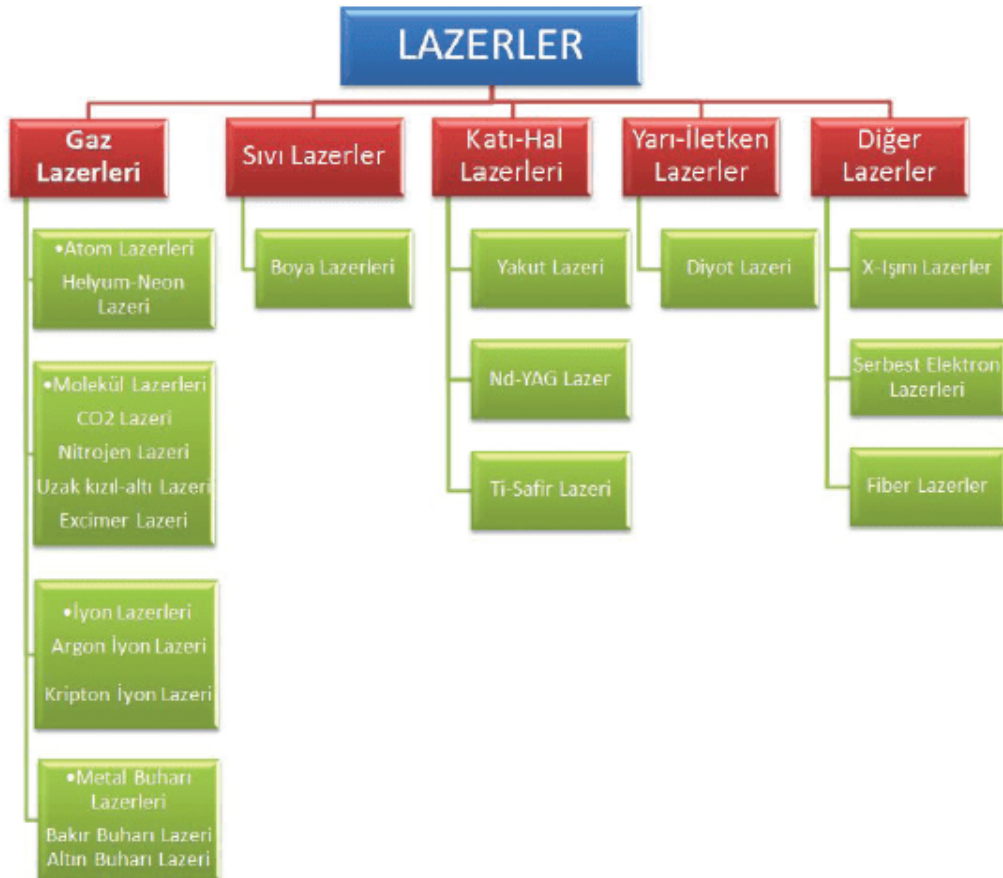
Herhangi bir ortamda bulunan bir elementin sahip olduğu atomları, molekülleri veya iyonları farklı birçok enerji düzeyi sergiler. Bu parçacıklar, farklı enerji düzeyleri arasında gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye teşvik edilebilir ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla senkronize olur [42].

Her elementin atom yapısında yalnız o elemente özgü olan elektron yerleşim düzeni vardır. Böylece elementteki atomların elektronları kararlı yörüngeleri olan belli bir enerji düzeyinde gezinirler. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların,

dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılması ile bu elektronlar bir üst yörüngeye çıkar ve daha sonra tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında aldığı enerjisi dışarı geri verir. İşte bu esnada dışarı geri verdiği enerji lazerin çalışma mantığını oluşturmaktadır [42].

Eğer atom dalga boyu yani yayılan ışının rengi, kendisine uygun düşmeyen bir dalga boyu ile uyarılırsa, enerjisini rastgele ışın şeklinde yayar. Eğer kendisine tam olarak uygun düşen bir ışık dalga boyu ile uyarılırsa çok kısa bir sürede yerleştirildiği ışık demeti ile aynı doğrultuda ve daha parlak bir ışık demeti şeklinde ışınır. Bu bindirilmiş (yükseltilmiş) ışınım olayıdır [42].

3.4. LAZER ÇEŞİTLERİ



Şekil 3.1. Lazer çeşitleri [57].

Yukarıda gösterilen birçok lazer çeşidi vardır ve bu çalışmada CO₂ lazeri kullanılmıştır. Lazerlerin dalga boyu boyunca görünür lazer radyasyonu için yüzey elektron devresine ve işleme materyalleri için iyonizasyon etkilerine kadar genel ultraviyole lazerler ile moleküler titreşim seviyesine olan miktarları belirleyicidir. CO₂, Nd: YAG ve fiber lazer, hızlı diyotlar için kullanılan en popüler sistemlerdir ve bu noktada eksimer lazer de karşımıza çıkmaktadır [23].

3.4.1. Gaz Lazerler

Gaz lazeri, lazer ışığı üretmek için lazer ortamı içindeki bir gaz vasıtasıyla bir elektrik akımının boşaltıldığı bir lazerdir. Gaz lazerlerde, lazer ortamı gaz halindedir. Gaz lazer, elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştüren prensip ile çalışan ilk lazer tipidir. Bu lazer spektrumun kızıl ötesi bölgesinde 1.15 µm'de lazer ışını üretir. Gaz lazerlerin Argon – İyon lazerler, Helyum (He) – Neon (Ne) lazerler, karbonmonoksit lazerler karbondioksit lazerler, vb. gibi farklı türleri vardır. Lazer ortamını oluşturan gazın çeşidi lazerin dalga boyunu veya verimliliğini belirler [23].

3.4.2. Katı Lazerler

Katı lazerlerin imalatı yarı iletken teknolojisine dayanmaktadır ve katı lazerler, yarı iletken olmayan kristallerden üretilmektedir. Katı lazerlere örnek olarak verilen içerisine CR+3 ilave edilen yakut kristallerinden elde edilen yakut lazeridir. Silindirik bir çubuk biçiminde AL₂O₃ içerisinde çözündürülmüş %0.005 CR+3 iyonları ile elektrik lambasından oluşturulan yakut lazeridir. Yakut lazerinde, yayılan fotonlar CR+3 iyonlarını uyarmak suretiyle enerji seviyelerini yükseltir. Foton yayan elektronların enerji seviyelerinde meydana gelen düşüş ve uyarılan Cr elektronunun sayısında yaşanan artış süresince daha fazla elektron dalgaları oluşur ve yayılır. Endüstriyel alanda kullanılan en yaygın katı cisim lazeri Neodim YAG lazeridir. Bu türde Neodim, lazer yayan eleman görevini üstlenir. Katı cisim atomları gaz lazerlere göre daha yoğun biçimde dizildiğinden atom yoğunluğu fazladır. Bu nedenle katı lazerlerin çıkış yoğunluğu diğer lazere oranla daha yüksektir [3].

3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

CO₂, Nd: YAĞ ve Excimer lazerlerinin çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılması verilmiştir [43].

Çizelge 3.2. Lazer Türlerinin Karşılaştırılması [43].

Karşılaştırma	CO ₂ Lazeri	Nd: yağ Lazeri	Excimer Lazeri
Dalga Boyu (µm)	10,6	1,06	0,3-0,2
Tahrik Tekniği	Düşük Başınçlı Gaz Boşaltımı	Ark Lambası	Yüksek Başınçlı Gaz Boşaltımı
Çalışma Şekli	CW/P	P/CW	P
Maksimum Güç(kw)	25	2	0,4
Darbe Gücü(kw)	10 kW'a kadar	100 kW'a kadar	30000 kW'a kadar
Işın Kalitesi	Maksimum	Düşük	Düşük
Verimlilik (%)	5-10	2-5	1-2
Fiyat(x1000Avro)	500	800	650
Kullanım Yerleri	Termik prosesler makro işleme	Termik prosesler mikro işleme	Mikro alanda termik olmayan işlerde

3.6. LAZERDE FARKLI MALZEMELERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ

3.6.1. Endüstriyel Çelikler

Endüstriyel çeliklerin kesilmesi işlemi esnasında, kesme gazı olarak oksijen gazı kullanılmaktadır. Çeliklerde karbon oranındaki artış, kesme kenarlarında malzeme sertleşmesine neden olur. Bu nedenle kesilen köşelerde yanık izleri görülür. Sertliğin kesme hızı üzerinde ise herhangi bir etkisi görülmemiştir [27].

Alaşım oranı daha yüksek olan malzemelerin kesilmesi işlemi, göreceli olarak daha düşük alaşım oranına sahip malzemeleri kesmekten zordur. Malzemenin sahip olduğu alaşım oranının yanı sıra, malzemenin oksitli olması veya kesilecek malzeme yüzey kalitesinin kötü olması da, kesme işlemini olumsuz etkilemektedir [27].

Karmaşık geometriye sahip malzemelerin lazer ile kesiminde, lazer darbeleri olarak uygulanır. Bunun amacı, ince kesitlerin ve küçük açılı malzemelerde oluşabilecek yamaların engellenmesidir. Malzemenin kesme işlemi esnasında absorbe ettiği ve malzeme yüzeyinde depolanan sıcaklık, kesim kalitesini negatif etkilemektedir [27].

3.6.2. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çeliklerin kesilmesi işleminde, kesme gazı olarak oksijen ve azot gazları kullanılabilir. Aynı kalınlıklara sahip çeliklerin kesilmesi işleminde, yüksek basınçlı azot gazı kullanımı, oksijen gazı kullanımına kıyasla daha hızlı bir kesim sonucu verir [27].

Azot ile kesimde 5mm'den itibaren tüm tabla yüzeyindeki paslanmaz çeliği 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 [27].

Kesme işleminde 5 mm sac kalınlığına sahip malzemeler kesilecekse ve gaz olarak oksijen kullanılacaksa, düşük kesme hızında ve darbeleri kesim yapılması gerekmektedir. Bu çeliklerde de alaşım elementlerinin ihtivası kesim sonuçlarını etkilemektedir [27].

3.6.3. Alüminyum

Lazerle kesim işleminde ışık kaynağı kullanılması, malzeme yüzeyinin parlaklığının ışını geri yansıtması nedeniyle alüminyum gibi malzemelerde negatif etkilere yol açmaktadır. Ancak buna rağmen, alüminyum alaşımlarda 6 mm kalınlığa kadar kesim işlemi yapılabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının kesilmesi işleminde darbeleri lazer moduna gerek yoktur ve kesiminin sürekli modda yapılması tavsiye edilmektedir [27].

Aluminyum kesme işleminde, oksijen yerine azot gazının kullanımı, kesme işlemi sonrasında daha temiz bir yüzey elde edilmesini sağlar. Çapaksız bir kesme işlemi 4 mm kalınlığa kadar yapılabilmektedir. Kalınlığı 4 mm değerinden yüksek malzemelerde ise, çapak oluşumu gözlenmektedir [27].

3.6.4. Titanyum

Titanyumun oksijenle tepkimeye girmeye oldukça meyilli olması ve hızlı oksidasyon nedeniyle, titanyumun kesilmesi işlemlerinde argon gazı kullanılır. Titanyumun kesilmesi işlemlerinde azot gazı da kullanılabilir, ancak oksijen gazı kullanılamaz. Oksijen kullanılması durumunda titanyum yanmaktadır [27].

3.6.5. Bakır ve Pirinç

Bakır ve pirinç malzemeler ışığı çok iyi yansıtma ve yüksek ısı iletkenliğine sahiptir. Pirinç malzemeler 3 mm kalınlığa kadar azot gazı kullanılarak kesilebilir. Bakır ise, oksijen kullanılarak 3 mm kalınlığa kadar kesilebilir [27].

3.6.6. Sentetik Malzemeler

Lazirli kesme işlemlerinde, sentetik malzeme türlerinden termoplastik, termoset malzemeler ve sentetik kauçuk malzemeler kesilebilir. PVC ve polietilen malzemelerin kesim işlemlerinde, yoğun duman oluşumunu engellemek için su jeti kullanılmalıdır. Kesme gazı olarak ise, 0,5 bar değerinden daha düşük azot gazı kullanılabilir. Böylece daha parlak ve düzgün kesme yüzeyleri oluşacaktır [27].

3.6.7. Organik Malzemeler

Organik malzemelerden ise, tahta, deri, kâğıt gibi malzemeler lazer ile kesilebilir. Ancak bu malzemelerin kesilmesi sonrası kesilen kenarlar yanmaktan kömürleşecektir. Yapışkan tahta işlerken her yapışkan tipi ve çeşidine bağlı olarak temiz bir işleme garantisi elde etmek imkansızdır [27].

3.7. LAZER UYGULAMA ALANLARI

Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda gün geçtikçe daha da önemli olmaktadır [44].

Endüstri için kullanımlarda;

- Herhangi bir malzemenin yüksek hassasiyet altında kesme, delme, eritme, lehimleme ve şekil verme işlemlerinde
- Mikroelektronik sektöründe dirençlerin aktif veya pasif olarak 0,01% hassasiyet ile üretilmeleri
- ip imalatında devre hat kalınlıklarının 0,25 μm 'den daha az değerlerde işlenmesinde
- Maddelerin analiz işlemlerinde
- Yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün ölçülmesinde
- Yüzey sertleştirme işlemlerinde

Bilimsel araştırmalarla ilgili çalışmalarda;

- Yüksek hassasiyette bilimsel ölçümler (ışık hızı ölçümü)
- Yerküre üzerinde meydana gelen hareketlerin hassas olarak ölçümü
- Malzemelerin kimyasal analizlerinin yapılmasında
- Yeryüzü ile uydular arası haberleşme sistemlerinde
- Dünya üzerindeki haberleşme ağında fiber-optik sistemlerle birlikte kullanılması
- Yüksek yoğunlukta ses ve görüntü bilgileri depolanması (compact disc, video disc)

Tıp alanında;

- Zarar görmüş dokuların lazer yardımıyla keserek alınması
- Yaraların lazer ile yakılarak iyileştirilmesi
- Kanamanın lazer ile ısı uygulanarak durdurulması

- Göz retinasında oluşan zedelenmelerin lazer ile yapılan operasyonlarla giderilmesi

Askeri alanlarda yapılan çalışmalarda;

- Açısal hassasiyet gerektiren alanlarda (ışınımının doğrusal şekilde olması)
- Uzun mesafelerle yapılan iletişimde (Lazer gücünün yüksek olması)
- Mesafe ölçümlerinde hassasiyet (darbe genişliğinin çok dar olması)
- Selektif tespit (spektral band aralığının çok dar olması sebebi ile)
- Kullanım kolaylığı (küçük boyutta ve hafif olmaları)

3.8. LAZERLERDE KULLANILAN KESME GAZLARI

Lazer ile yapılan işlemlerde, gerek ortamdaki fazla sıcaklığın uzaklaştırılması, gerekse oksidasyonun engellenmesi veya sıcaklıkla birlikte farklı tepkimelerin oluşmasını engellemek amacıyla, yapılan lazer operasyonuna uygun kesme gazlarının kullanılması gerekir.

3.8.1. Oksijen

Lazerin sağladığı yoğun ve yüksek ısı enerjisi, yakarak kesme işlemlerinde gereklidir. Yakarak kesme işlemlerinde, oksijen kullanılarak, iş parçası ile egzotermik reaksiyona girmesi sağlanır ve bu reaksiyon esnasında meydana çıkan ekstra ısı, sıcaklığı artırarak kesme hızının artırılabilmesini sağlar. Bu nedenle, oksijenin saflığı, kesme kalitesini ve curüf birikiminde ayrıca çapak oluşumunda etkilidir. Oksijenin saflığındaki örneğin % 99,97'den % 99,5'e bir azalma, lazer ışınıyla yakarak kesme işleminde kesme hızında önemli oranda bir düşüşe neden olur. Kullanılan oksijen ne kadar saf olursa kesme de o derece hızlı olur [45].

3.8.2. Azot ve Argon

Lazer kullanılarak yapılan kesme işlemleri, eritilerek veya buharlaştırılarak bölgeden fazla malzemenin uzaklaştırılması prensibine dayanmaktadır. Eritilmiş veya

buharlaştırılmış malzemenin ise, hızla kesme bölgesinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Kesme bölgesinden bu eritilmiş veya buharlaştırılmış malzemenin uzaklaştırılması için gazlar kullanılmaktadır ancak bu işlem için seçilecek olan gazın aynı zamanda kesme bölgesinde malzeme ile herhangi bir reaksiyona girmemesi gerekmektedir. Bu nedenle, bu işlemlerde, malzeme yapısına göre gazlar tercih edilir. Soy gazlar veya düşük reaksiyon hızına sahip gazlar tercih edilir. Bu gazlar için en uygun seçenekler argon ve azot gazlarıdır. Bu gazlar, kesme yarığında yanma reaksiyonlarını ve kesme yüzeylerinde oksidasyon oluşumunu engellemektedir. Lazerle yakarak kesmedeki gibi kesme yüzeylerinin işlenmesi gerekmez ve işçilik maliyetleri düşmektedir [46].

3.8.3. Basınçlı Hava

Basınçlı hava ince sac malzemelerin kesiminde kullanılabilir. Havanın içerisinde %80 oranında azot bulunduğundan hava kullanılarak yapılan kesme işlemleri eriterek kesme işlemleridir. Erimiş metalin kesme bölgesinden uzaklaşması için hava basıncının 5-6 bar arasında olması gerekmektedir [1].

BÖLÜM 4

LAZERLE KESME VE DELME İŞLEMİ

4.1. LAZER IŞINI İLE KESME

Kesilen kısımdan malzemenin uzaklaştırılmasına göre üç farklı lazer kesme yöntemi mevcuttur ve bu kesme yöntemleri işlem görecek malzemeye göre belirlenmelidir [47].

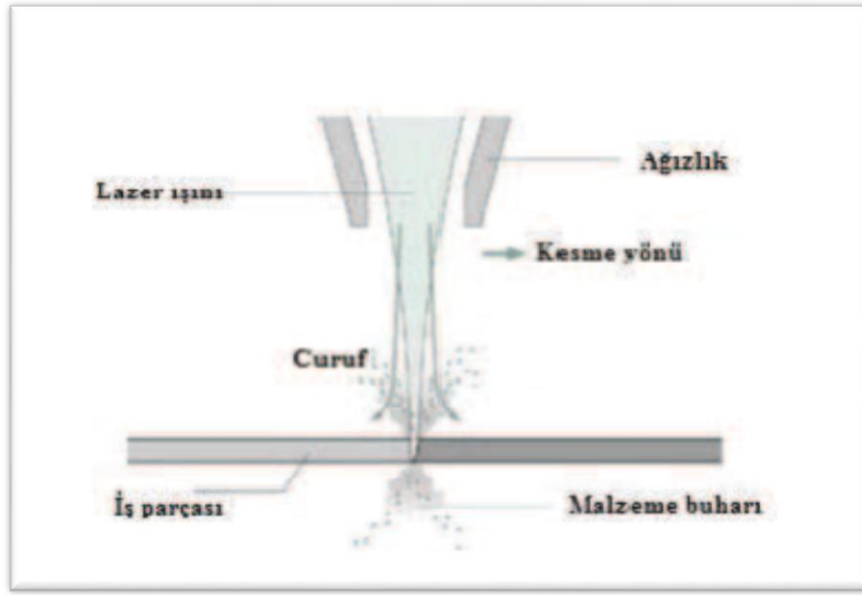
- Süblimleştirme ile kesme
- Yakarak kesme
- Ergiterek kesme

4.1.1. Lazer ile Süblimleştirerek Kesme

Süblimleştirerek kesmede malzeme lazer ışınının etkisi ile kesme kafası önünde doğrudan buharlaşmaktadır. Bu tür kesme fazı, katı eriyiğe geçme fazı tam belirgin olmayan veya ergiyik halde çok dar sınırlarda kalan tahta, kağıt, seramik ve plastik gibi malzemelerde gerçekleştirilebilmektedir [29].

Bu yöntemde darbeli lazer ile metallerin kesilmesinde çok yüksek bir lazer güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Lazer ışını ve malzeme arasındaki etkileşim bölgesinde oluşan ergiyik faz ısı kayıpları minimum düzeyde azaltılabilmektedir. Kalın parçaların bu yöntemle kesilmesi uygun değildir; çünkü buharlaşan malzeme, kesme sırasında oluşan kerf aralığını tekrar kapatmaktadır [48].

Bu yöntemde hemen hemen ergime olmamakta ve ilave gazın yardımı ile parlak bir kesim yüzeyi elde edilebilmektedir. Yüksek ve genellikle darbeli verilen enerji çok dar bir ısı etkisi altında kalan bölge (ITAB) oluşturmaktadır. Kesilen kenarlarda oksidasyon oluşmamakta ve böylece kesme aşamasından sonraki kullanımında, geleneksel yöntemlerle kesilmiş malzemelere göre bir üstün özellik sağlamaktadır [48].



Şekil 4.1. Lazer-süblimleştirme kesme sistemi [49].

4.1.2. Lazer ile Yakarak Kesme

Bu yöntem metallerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kesme sırasında oksijen, ilave kesme gazı olarak lazer kesme kafasının yanından verilmektedir. Oksijen etkisi ile kesme bölgesinde oluşan ekzotermik (dışarıya ısı veren) tepkime, lazer ışınından daha yüksek bir ısı gücü oluşturmaktadır [49].

Ulaşılan kesme hızları, 6 ile 8 faktör arasında yer almakta olup, ergiterek kesme yönteminden daha hızlı bir yöntemdir. Yöntemin esası, lazer ışınının sınırlandırılmış bir bölgeyi ön ısıtması ve bu bölgede malzemeye enerji taşınmasına dayanmaktadır [49].

4.1.3. Lazer ile Ergiterek Kesme

Ergiterek kesmede ana unsur malzemenin ergiyik fazda kalma süresidir. Bu ergiyik kısım kesme kafası aracılığı ile ortamdan uzaklaştırılmaktadır. İlave gaz malzemesi olarak genellikle inert azot veya argon (Ar) kullanılmaktadır. Bu yöntem ile kesilen tipik malzemeler, amorf davranış sergileyen cam ve plastikler ve metallerdir [49].

Standartlaştırılmış bir ergiterek kesme işleminde;

- Malzemenin buharlaşmasına olanak tanınmayacak zamanda işlem yapılmalıdır.
- Argon gibi soygazlar kesme kenarında oksidasyon oluşumunu engellemektedir.
- Yakarak kesme ile karşılaştırıldığında kesme hızı daha düşüktür.
- Yüksek alaşımlı çelikler dahil, bütün metallerin kesilmesi bu yöntemle mümkündür. [49]

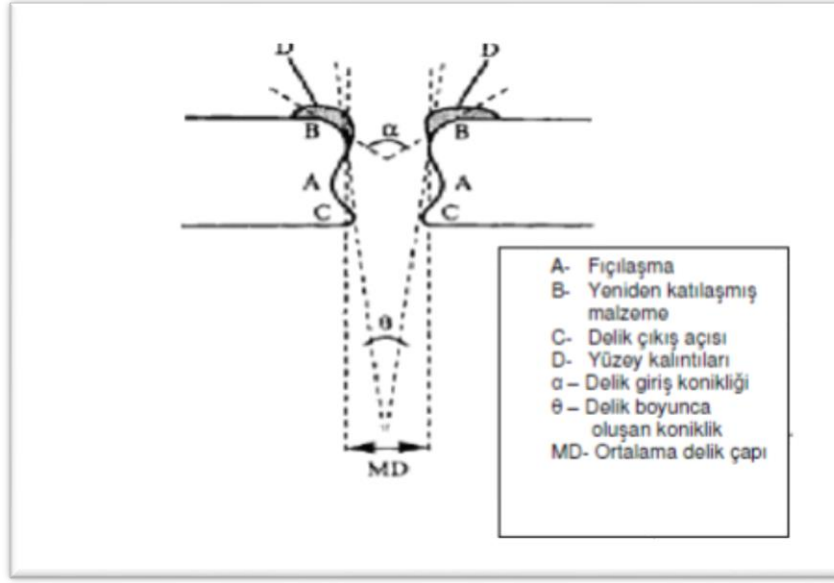
4.2. LAZER IŞINI İLE DELME

Lazerle delme işlemi, küçük veya mikro delme alanları oluşturmak için endüstriyel bir çözümdür. Lazerle delme işlemi geniş uygulama alanına sahip olan temel lazer işleme metotlarından birisidir. Optimal parametreler ayarlanıp kesim işlemi yapılırsa, deliklerin kalitesi ve hassasiyeti mükemmel yakın değerlerde olur [50].

Lazer ışını ile yüksek hızlarda hemen hemen bütün malzemelere delme işlemi uygulanabilmektedir. Lazer ile delmede gerekli olan buhar basıncını oluşturabilmek için güç yoğunluğu değerinin $10^6 - 10^8 \text{ W/cm}^2$ aralığında olması gerekmektedir [49].

4.2.1. Lazerle Delmede Delik Özellikleri

Lazerle delme işlemi birçok parametreye bağlıdır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi delme anında özellikle kalın malzemelerde delik içinde meydana gelen süreç gösterilmiştir. Bu süreç aşağıda detaylı olarak anlatılmıştır [51].



Şekil 4.2. Delik özellikleri [51].

- Fiçilasma: Delikte oluşacak fiçi görünümlü yapı kısmıdır.
- Yeniden katılmış malzeme: Delik iç yüzeylerindeki erimiş fakat dışarı çıkamamış ve tekrar katılmaya uğramış bölümdür.
- Çıkış açısı: Malzemenin ters kısmındaki delik çıkış açısıdır.
- Yüzey kalıntıları: Erime ve tepki basıncı sonucu oluşacak fişkırma neticesinde yüzeyde katılışp kalacak malzemedir.
- Delik giriş konikliği: Delme uygulanan kısımdaki giriş açısıdır.
- Koniklik: Delik boyunca oluşan daralmayı ifade eder.
- Ortalama delik çapı: Esas delik çapını ifade eder [51].

4.2.2. Lazerle Delme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar;

- Malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması: Yani gevreklik tokluk sertlik gibi özelliklerden bağımsızdır.
- Kısa işleme zamanı: Örnek olarak gaz türbinlerinde kullanılan filtrenin delme işlemi konvansiyonel tezgâhta 12 saat olurken lazerle 5 dk. içinde delinebilmektedir.

- Hassas işleme: Mikron derecesinde hatalarla delme yapabilmektedir.
- Kesme takımı ve iş parçası arasında temas yoktur.
- İşlemler bütünüyle düşünüldüğünde maliyetlerin az olması.
- Esnek kablolar vasıtasıyla elde edilen ışının taşınabilmesi mümkündür.
- Kalıpsız imalat [40].

Dezavantajlar:

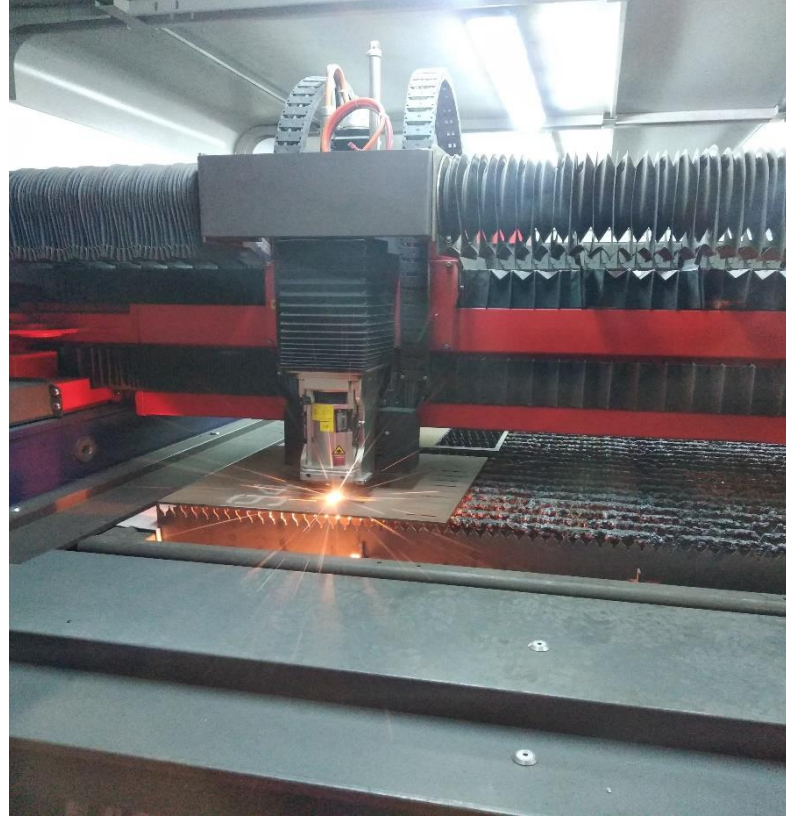
- Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Isıl işlemden kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar.
- Sınırlı kalınlık/çap oranı ($H/D=10$) [40].

4.3. KARBONDİOKSİT (CO₂) LAZERİ

Karbondiyoksit lazeri, lazerli malzeme işleme uygulamalarında en yaygın kullanılan lazer teknolojisi haline gelmiştir. Bu tür lazerlerin keşfi 1964 yılına kadar uzanmakta olup, o tarihten beri birçok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır [23].

Karbondiyoksit lazerleri, 10.6 µm dalga boyuna sahip kızılötesi lazer radyasyonu yaymakta olup, toplam verimleri %10 ile %13'tür. Karbondiyoksit lazerindeki lazer aktif ortam, karbondiyoksitin lazer aktif molekül olduğu CO₂, N₂ ve He gazlarının bir karışımıdır [23].

Karbondiyoksit lazeri bir tür gaz lazeridir. Bu makinede elektrik, gaz üreten bir tüpten geçer ve ışık çıkar. Borunun uçlarındaki aynalar için ise, bu aynalardan biri %99'a kadar yansıtma özelliğine sahip olup, diğeri ise ışık geçirimini sağlamaktadır. Gazların karışımı genellikle CO₂, N₂, H ve He'den oluşmaktadır. Karbon dioksit lazerlerin ürettiği ışık, ışık spektrumunun uzak kızılötesi alanına düşmektedir ve görünmez. Bir karbondiyoksit lazerinden gelen ışık kumaş, ahşap ve kağıt gibi çoğu malzemeyi kesebilecek kadar güçlü olup, en güçlü karbondiyoksit lazerleri çelik ve diğeri metallerin işlenmesinde kullanılır [23].



Şekil 4.3. CO₂ lazer tezgâhı.

4.3.1. CO₂ Lazer Tezgâhının Avantajları ve Dezavantajları

Maliyet Avantajı

- Lazer teknolojisi ile yüksek işleme hızına ulaşılmakta ve birim maliyet düşmektedir.
- Parça imalatında kalıp maliyeti yoktur.
- Aynı plaka sac üzerinden birbirinden farklı parçalar işlenebilir.
- Fire oranı minimum seviyeye indirilir.
- İşlenecek parçaların uygun olması durumunda ortak yüzeyler beraber kesilerek maliyet azaltılabilir.
- Büküm eksenleri markalanarak sonraki imalat aşamaları hızlandırılır ve maliyetler düşürülür [42].

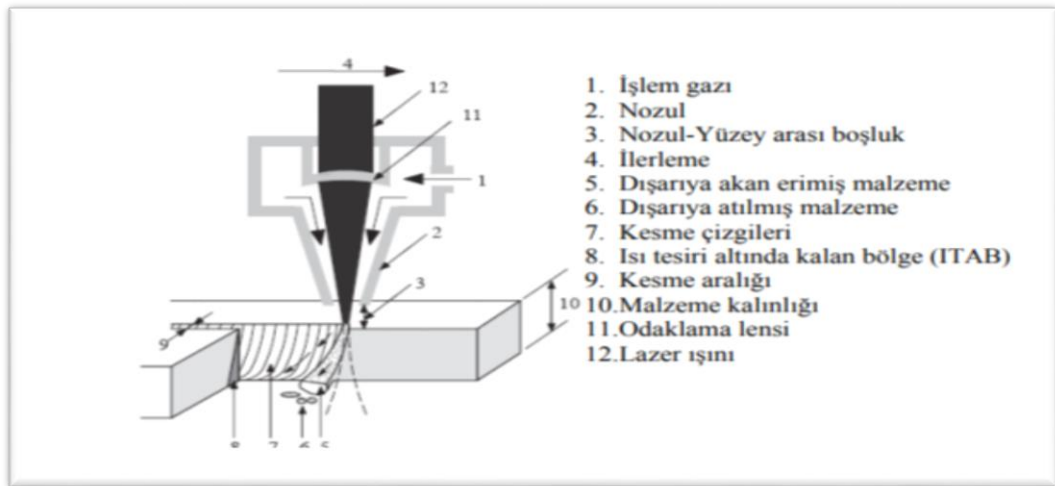
Kalite Avantajı

- Lazer teknoloji ile çapaksız bir kesim sağlanır ve ısı deformasyonu minimum seviyedir.
- Preste oluşan sac deformasyonları yoktur.
- Lazer teknolojisi ile sac kalınlığının 0,4 katı çapındaki delikler işlenebilir.
- 0,05 mm hassasiyet ile parçalar kesilir.
- Her türlü yazı, resim, amblem sac üzerinden kesilebilir.
- Zaman Avantajı
- Fiyatlandırma ve kesim işi kısa sürede yapılarak bir adım önde olmanız sağlanır [42].

Dezavantajlar

- Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Isıl işlemden kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar.
- Sınırlı kalınlık/çap oranı ($H/D=10$) [42].

4.4. LAZER KESME PARAMETRELERİ



Şekil 4.4. Lazer kesme yüzey karakteristikleri [43].

4.4.1. Kesme Hızı

Kullanılan lazer gücü ve gaz akış oranına göre kesme hızı dengelenmelidir. Kesme hızının arttırılmasıyla birlikte, kesme kenarlarında meydana gelen şeritler belirginleşir, kesme kenarı altında cüruf birikimi oluşur ve lazerin malzemeye nüfuziyeti azalır. Yumuşak çelik keserken oksijen kullanıldığında, düşük kesme hızlarında, kesme kenarlarında aşırı yanmalar meydana gelir. Bu da kenar kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) genişletir. Genellikle malzemeler için kesme hızları malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Hız, keskin köşe kesimlerindeki yanmalardan kaçınmak için azaltılmalıdır [49].

4.4.2. Kesme Gazları

Lazer kesim işlemlerinde, kesme kalitesi ve üretiminde kullanılan kesme gazlarının önemi oldukça fazladır. Genel olarak en yaygın kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajlarıyla beraber tercih edilir, bunlar; oksijen ve nitrojen gazlarıdır. Oksijen aktif gaz, nitrojen inert gazdır. Nitrojen ucuz olmasından dolayı, atıl gaz olmamasına rağmen yaygın kullanıma sahiptir. Atıl gaz olan argon ve helyum gazları ise, titanyum ve tityanyum gibi malzemelerin kesiminde kullanılır. Bu gazlar, oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önlediğinden tercih edilmektedir. Paslanmaz çelik, alaşımlı çelik, alüminum ve nikel alaşıma sahip malzemelerde, nitrojen gazı tercih edilir, çünkü kerf aralıklarından atıl malzemenin uzaklaştırılması için yüksek basınç gereklidir. Sağlanan yüksek gaz basıncı, kerf aralıklarından malzemenin uzaklaştırılması için ekstra fiziksel kuvvet sağlamaktadır. Yine benzer şekilde, yüksek basınçlı nitrojen paslanmaz çeliklerde kullanılır, bunun nedeni parlak ve oksitsiz kesilmiş kenar yapıları elde etmeyi sağlar. Oksijen kullanılması durumunda ise, daha düşük kesme hızları ile işleme gerçekleştirilmesi gerekir [49].

4.4.3. Odaklama Noktası

İyi bir kesme kalitesi elde etmenin ön şartlarından biri de doğru odaklama noktası tayin edebilmektir. Çeliğin alev kesiminde 6 mm'ye kadar olan sac kalınlıklarında uygun odaklama yüzeyde olmalı 8 mm ve üzerindeki sac kalınlıklarında odaklama sac yüzeyinin üzerinde olmalıdır [43].

4.4.4. Lazer Gücü

Lazer kesme işleminde, operasyon boyunca sabit güç değerinde homojen ve uniform bir kesme kalitesi sağlayabilmek için sabit güç gereklidir. Uygulanacak lazer Makine operasyonu boyunca sabit güç sağlanması uniform kesme kalitesiyle sonuçlanır. Uygulanacak lazer gücünün miktarı kesme kalitesi açısından son derece önemlidir. Lazer kaynağı ışımaya başladıktan sonra, sabit bir çıkış gücü elde edilmesi beş-on dakika aralığında bir süre zarfında gerçekleşir. Bu durum, geçici güç değişmezliğidir, sıcaklıktan ve gaz basıncından bağımsızdır [43].

4.4.5. Gaz Basıncı

Kullanılacak olan gazın basıncı, kesilecek malzeme kalınlığına göre ayarlanmaktadır. Oksijenle yapılan kesim işlemlerinde, gaz basıncı azot kullanılan işlemlere göre daha önemlidir. Lazerle yakarak yapılan kesme işlemlerinde, ince metalik iş parçaları, kalın olanlarına göre, daha yüksek basınçla kesilirler. Lazer ortamında yakarak yapılan kesme işlemlerinde, ince metalik parçalar, kalın olan parçalara oranla daha yüksek gaz basıncı gerektirmektedir. Bunun nedeni, artan kesilecek malzeme hacminde yaşanan artışın, daha fazla gaz gerektirmesidir. Yüksek basınçlı kesme işlemlerinin sağladığı bir diğer avantaj ise, yapışkan cüruf tabakasının daha kolay dışarı atılmasını sağlamasıdır. Oksijenli kesimde, gaz basıncı azalırsa, malzeme kalınlığı artması gerekirken, nitrojenli kesimde tam tersi bir durum söz konusudur [19].

4.4.6. Nozul Seçimi

Lazer kesimde farklı nozul çaplarından yararlanılır. Lazer atışı esnasında nozul ile sac yüzeyi arasındaki mesafe değişebilir. Doğru nozul seçimi delik kalitesi açısından çok önemlidir. Kesim esnasında nozula çarpan cüruflar nozulun deforme olmasına sebep olur bu da delik kalitesine negatif yönde etki eder [50].

4.4.7. Işın Merkezi Ayarı

Lensler tarafından odaklanan lazer ışığının nozulun tam ortasına denk gelmesi gereklidir. Eğer lazer ışını merkezden kaçık olursa kesim yüzeyleri bozulur ve kesilen parçaların alt kısımlarında çapaklanma oluşur [50].

BÖLÜM 5

HARDOX ÇELİKLERİ

Hardox, aşınma direnci konu olduğu zaman ihtiyaç duyulan en üst düzeydeki beklentilere yanıt verebilen bir aşınma levhasıdır. Düzgün dağılımlı yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve mükemmel tokluğun eşsiz bir şekilde bir araya getirilmesi bu malzemeyi birbirinden farklı çeşitli uygulamalar için çok uygun hale getirmiştir [8].

Bu çelikler ilk defa 1970 yılında piyasaya sunulmuş ve o günden bugüne kadar birçok farklı ihtiyaçları karşılamak üzere sürekli olarak geliştirilmiştir. Hardox levhasının, diğer yüksek mukavemetli yapı levhalarına kıyasla 4-5 kat daha sert olmasının yanı sıra mükemmel kaynak edilebilme ve işlenebilme özellikleri bu malzeme ile çalışmayı kolaylaştırmaktadır [8].

Aşınma endüstriyel piyasada ve mühendislik uygulamalarında en çok karşılaşılan problemlerdendir. Almanya'da yapılan bir araştırmada aşınmanın endüstriye verdiği zararlar yıllık iki milyar Euro'nun üzerinde olduğu belirtilmektedir [52].

Hardox, yüksek sertliğini ve mukavemetini, üstün tokluğunu modern roleli su verme hattında oluşturulan yüksek verimde suda su verme eylemine borçludur. Bu etkin proses sayesinde alaşım elementleri asgari düzeyde tutulabilir ve bu hem ürün hem de çevre açısından büyük avantajlar sağlamaktadır [8].

Hardox tokluğu, düşük sıcaklıklardaki aşırı zorlanmalar gibi güç şartlar altında bile çok yüksek olması sıradan bir aşınma levhası olmadığına göstergesidir. Bu durum özellikle Hardox'u darbelere karşı güçlü kılmaktadır. Bu durumlar, çeliğin uygun bileşimi ve optimize edilmiş bir üretim prosesinin neticesidir [8].



Şekil 5.1. Hardox aşınma levhasından imal edilmiş bir damper kasası [8].

5.1. HARDOX ÇELİK TÜRLERİ

5.1.1. HARDOX 400 serisi

İyi bir kaynak edilebilme özelliğine sahip olan bu çelik 400 HB sertliğe sahiptir. Yüksek oranda aşınma göstermeyen yapıların imalinde kullanılabilir. Yüksek düzeydeki tokluk değeri, iyi bükülebilir ve kaynaklanabilirlik özellikleri sayesinde, orta düzeyde aşınmaya maruz kalan yapılarda kullanılabilmektedir [7].

5.1.2. HARDOX 450 serisi

Bu aşınma plakası 450 HBW'lik sertlik seviyesi olan dirençli bir dış yapı çelik grubudur. Bu çelik sınıfına ait olan özellik, sıkılığın ve sertliğin, karakteristik bir özellik olan Hardox işleme kolaylığından taviz verilmeden gerçekleştirilmiş olmasıdır. 400 dereceye ek olarak 50 Brinell daha yüksek olan Hardox 450'nin sağladığı daha iyi aşınma direnci ve daha uzun aşınma ömrüyle, daha da fazla tasarruf sağlayabilmektedir [8].

5.1.3. HARDOX 500 serisi

Hardox 500 bükülebilir ve kaynaklanabilen aynı zamanda taşlama direncine sahip

olan bir plakadır. Daha yüksek seviyede dış yapı direnci isteyen uygulamalarda kullanılabilir [8].

5.1.4. HARDOX 600 serisi

Hardox 600 aşınma plakası saf, dirençli bir dış yapı plakası olup çok yüksek seviyede dirence sahiptir. Özellikle yüksek aşınma için sert ve tok bir özellik sergileyen bu çelik kesilebilme ve kaynaklanabilme kabiliyeti sebebiyle yüksek mukavemet uygulamaları için tercih edilen bir çeliktir [52].

5.1.5. HARDOX HiTuf serisi

350 HB sertliğe sahip bu çelik aşırı ısınma sonucunda çatlamalara maruz kalmamak için özel olarak imal edilmiştir. Özellikle bıçak, yıkım makinesi elemanı ve parçalayıcı makine elemanları yapımı için imal edilmiştir [52].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmada Hardox 450 çeliğinin lazer ile delinmesinde işleme parametrelerinin (kesme hızı, basınç, lazer gücü ve odak noktası) yüzey pürüzlülüğü, üst ve alt delik dairesellik toleransına etkileri incelenmiştir. Lazer işleme parametrelerinin optimum seviyelerini ve yüzey pürüzlülüğü, üst ve alt delik dairesellik toleransı üzerine etki oranlarını belirlemek için sırasıyla, S/N oranı ve varyans (ANOVA) analizleri yapılmıştır.

6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME

Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 450 çeliği 140x290x6 mm ebatlarında temin edilmiştir. Hardox çeliğinin kimyasal birleşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmada kullanılan Hardox 450 çeliğinin kimyasal birleşimi.

Malzeme Cinsi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
HARDOX 450	0,26	0,70	1,60	0,025	0,010	1,40	1,50	0,60	0,005

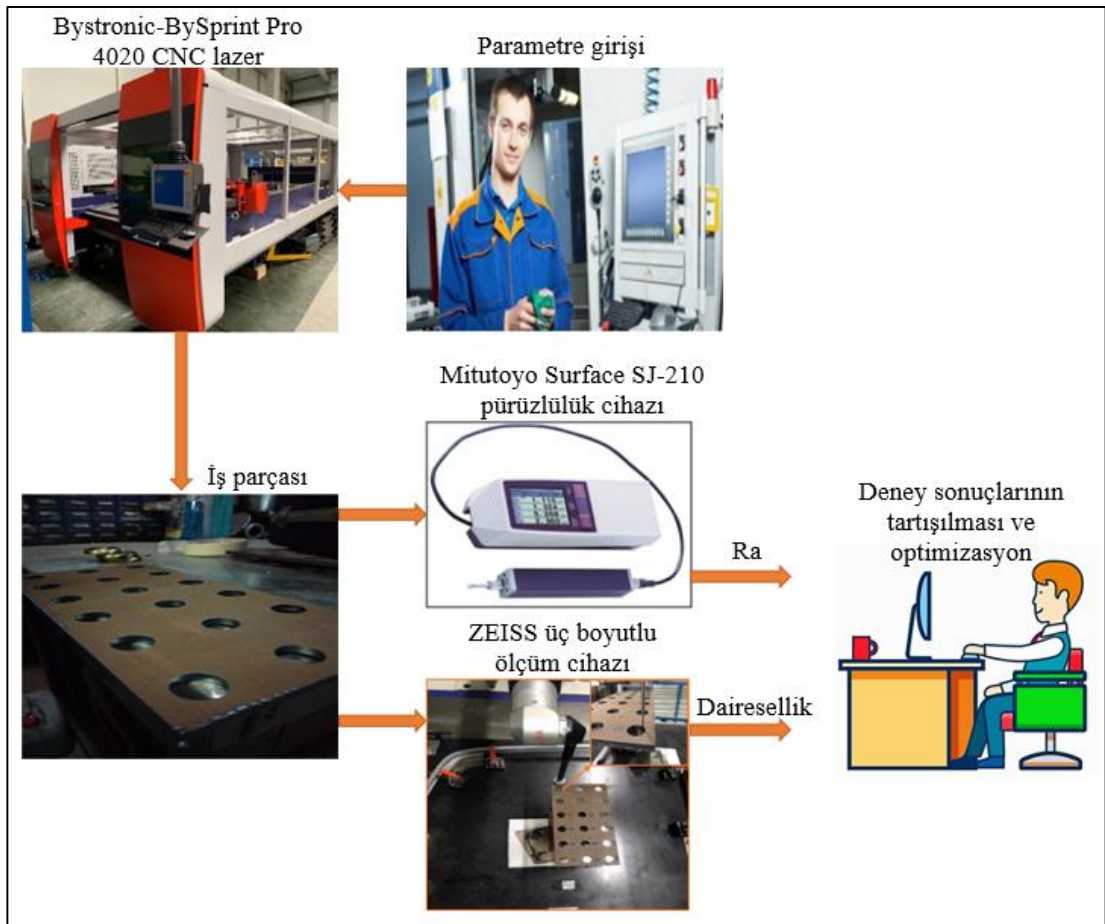
Çizelge 6.2. Deneysel çalışmada kullanılan Hardox 450 çeliğinin mekanik özellikleri.

Çekme mukavemeti (MPa)	1400
Akma mukavemeti (MPa)	1200
Sertlik (HB)	425-474

6.2. DENEY DÜZENEGİ

Yapılan çalışmada Kromlüks A.Ş. firmasında bulunan Bystronic-BySprint Pro 4020 marka CNC lazer kesim tezgâhı kullanılmıştır. CNC lazer kesim tezgâhının çalışma

mesafesi X eksenini 4,064 mm, Y eksenini 2,032 mm, Z eksenini 70 mm, pozisyonlama sapması $\pm 0,1$ mm ve tekrarlama hassasiyeti $\pm 0,05$ mm'dir. Lazer delme işlemlerinde Oksijen (O₂) gazı kullanılmıştır. Lazer ışınının çıkış noktası olan ucun çapı (nozzle) ise 1mm olarak seçilmiştir ve lens çapı 38,04 mm'dir. Lazer delme işleminden sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri yapıldı ve deliklerin alt ve üst dairesellikleri 3 boyutlu kordinat ölçüm cihazında (CMM) yapılmıştır. Ölçüm sonuçları çubuk grafikleri haline getirilmiş ve verilerin istatistiksel analizi yapılmıştır. Şekil 6.1'de verilen şematik deney düzeneği izlenerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 6.1 Şematik deney düzeneği.

6.3. DENEY TASARIMI

Taguchi yöntemi, mühendislik malzemelerinin işlenebilirliğinin belirlenmesinde daha az deney ile en doğru sonucu elde etmek mümkündür [53,54]. En düşük yüzey pürüzlülüğünün, alt ve üst delik toleranslarının belirlenmesinde S/N oranı analizinden

yararlanılmıştır. S/N oranlarına bağlı olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü, alt ve üst delik tolerans değerlerinin hesaplanmasında Eş 1’de verilen en küçük en iyi denklemi kullanılmıştır. İşleme parametrelerinin her bir seviyesi için S/N oranları hesaplanmıştır.

$$\text{En küçük en iyi: } S/N = -10 \log(1/n \sum_{i=1}^n Y_i^2) \quad (6.1)$$

Lazer delme işleminde deliklerin kalitesinin doğrudan etkileyen işleme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada işleme parametresi olarak odak noktası, basınç, lazer gücü ve kesme hızı seçilmiştir. Çizelge 6.3’de lazer işleme parametreleri için kontrol faktörleri ve seviyeleri verilmiştir. Lazer delme deneyleri için optimum işleme parametrelerini belirlemek için deney tasarımı L₁₈ dizinine göre tasarlanmıştır.

Çizelge 6.3. Lazer delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Semboller	Kontrol Faktörler	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Odak Noktası	(mm)	-0,5	-1	-
B	Gaz Basıncı	(bar)	0,7	0,8	0,9
C	Kesme Hızı	(mm/sn)	1100	1300	1500
D	Lazer Gücü	(Watt)	2200	2400	2600

6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Yüzey pürüzlülüğü ölçümü Çizelge 6.4’te özellikleri ve görseli bulunan, otomatik kalibrasyon yapma kabiliyetine sahip, 17,5 mm tarama boyu bulunan, DIN, ISO, ANSI parametreleri ölçebilen, Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülük test cihazı kullanılmıştır. Lazer delme işlemleri sonucu oluşan her bir deliğin eksenine paralel ve her 90⁰ bir ölçümler yapılarak toplamda dört ölçüm yapılmıştır. Bu dört ölçümün aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

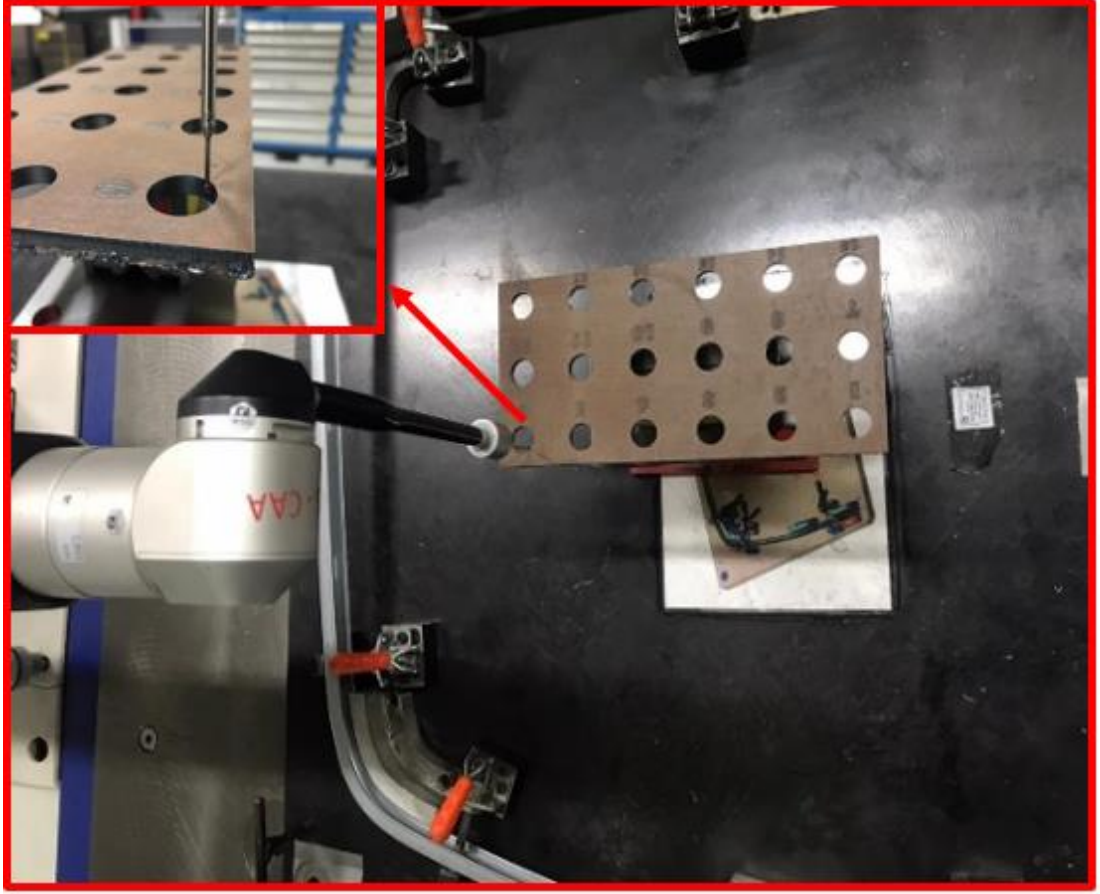
Çizelge 6.4. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının teknik özellikleri.

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



6.5. DELİK ÇAPLARININ ÖLÇÜMÜ

İmalat endüstrisinde, delme işleminde arzulanan delik kalitesinin elde edilmesi önemli noktalardan biridir. Özellikle lazerle delik delmede matkapta delik delmede olduğu gibi delmeyi gerçekleştiren belli bir geometriye sahip kesici takım yoktur. Bunun için delik çapının toleransı teknik resimde belirtilen toleranslara göre kontrol edilir. Ayrıca lazerle delik delmede istenen ölçü tamlığında sağlamak çok zordur. Lazerle delik delmede yapılan hatanın giderilmesi çok güçtür bunun için farklı talaşlı imalat tezgâhları kullanılmaktadır. Bu çalışmada kesme parametrelerine bağlı olarak iş parçası üst ve alt yüzeyindeki delik çaplarındaki değişimler 3 boyutlu kordinat ölçüm cihazında (CMM) yapılan ölçümlerle değerlendirilmiştir. Şekil 6.2’de delik çaplarındaki değişimlerin ölçüm görseli verilmiştir.



Şekil 6.2. Delik çaplarının lümü.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

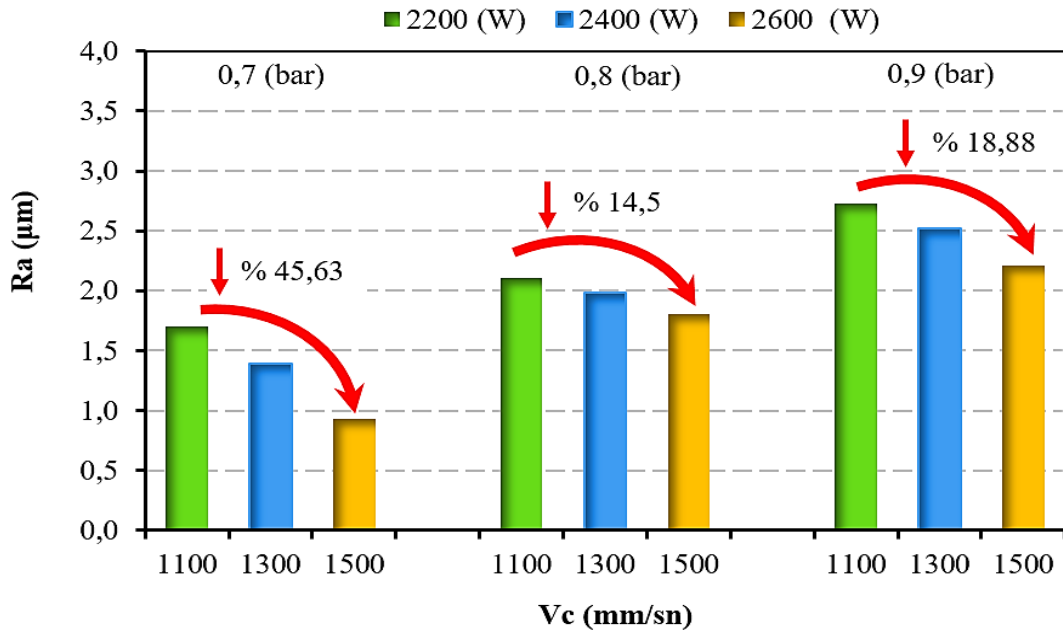
Yapılan çalışmada Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesi sonucu oluşan deliklerin yüzey pürüzlülükleri (Ra) ile iş parçası üst ve alt deliklere ait dairesellik toleransı ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Çizelge 7.1’de deneyler sonucunda elde edilen veriler görülmektedir.

Çizelge 7.1. Deneyler sonucu elde edilen veriler.

Deney No	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (watt)	Yüzey pürüzlülüğü (µm)	Üst Dairesellik (mm)	Alt Dairesellik (mm)
1		0,7	1100	2200	1,471	20,069	20,024
2		0,7	1300	2400	1,255	20,089	20,032
3		0,7	1500	2600	0,718	20,113	20,043
4		0,8	1100	2200	1,978	20,101	20,048
5	-1	0,8	1300	2400	1,822	20,114	20,056
6		0,8	1500	2600	1,518	20,129	20,065
7		0,9	1100	2200	2,578	20,115	20,063
8		0,9	1300	2400	2,371	20,131	20,075
9		0,9	1500	2600	2,029	20,145	20,082
10		0,7	1100	2200	1,705	20,098	20,042
11		0,7	1300	2400	1,388	20,107	20,049
12		0,7	1500	2600	0,927	20,124	20,054
13		0,8	1100	2200	2,108	20,115	20,059
14	-0,5	0,8	1300	2400	1,985	20,127	20,067
15		0,8	1500	2600	1,802	20,139	20,074
16		0,9	1100	2200	2,728	20,132	20,071
17		0,9	1300	2400	2,516	20,138	20,082
18		0,9	1500	2600	2,213	20,152	20,096

7.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

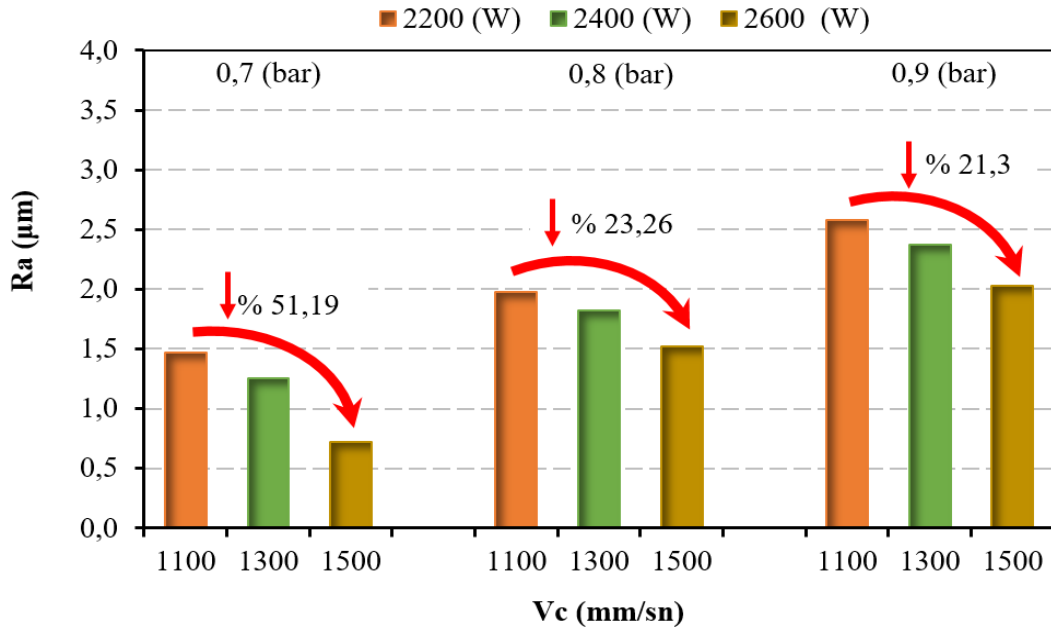
Yapılan çalışmada Hardox 450 malzemesi üç farklı kesme hızı, üç farklı gaz basıncı, üç farklı lazer gücü ve iki farklı odak noktası kullanılarak lazer delme deneyleri yapılmıştır. Lazer delme işlemleri sonucu oluşan deliklerin yüzey pürüzlülüğü (Ra) delik eksenine paralel olacak şekilde farklı noktalarından yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 7.1. -0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Şekil 7.1’de -0,5 mm odak noktasında üç farklı kesme hızı (1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) ve üç farklı lazer gücünde (2200 W, 2400 W ve 2600 W) yapılan deneyler için yüzey pürüzlülük sonuçları verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde yüzey pürüzlülük değeri 1,705 µm ölçülmüştür. Kesme hızının 1300 mm/sn’ye ve lazer gücünün 2400 W çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü % 18,6 oranında azalarak 1,388 µm olmuştur. -0,5 mm odak noktasında yapılan deneylerde kesme hızının (1500 mm/sn) ve lazer gücünün (2600 W) maksimum değere çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü % 45,63 oranında azalarak 0,927 µm ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Şekil 7.1’de 0,8 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn

kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde yüzey pürüzlülük değeri 2,108 μm olmuştur. Kesme hızının (1300 ve 1500 mm/sn'ye) ve lazer gücünün (2400 ve 2600W) artırılması ile yüzey pürüzlülüğü sırası ile % 5,83 (1,985 μm) ve % 14,52 (1,802 μm) oranlarında azalma olmuştur. 0,9 bar gaz basıncında yapılan deneylerde ise 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde 2,728 μm ile en yüksek yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Diğer deneylerde olduğu gibi kesme hızının (1300 ve 1500mm/sn'ye) ve lazer gücünün (2400 ve 2600 W) artırılması ile yüzey pürüzlülüğü azalarak 2,516 μm ve 2,213 μm olmuştur. Ayrıca Şekil 7.1'de yapılan bütün deneylerde gaz basıncının düzenli olarak (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) artırılması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde gözle görülür bir artma olmuştur. Örneğin; -0,5 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1500 mm/sn kesme hızında ve 2600 W lazer gücünde yüzey pürüzlülüğü 0,927 μm ölçülmüştür. Odak noktası, kesme hızını ve lazer gücünü sabit tutarak gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü %138,73 (2,213 μm) oranında artma olmuştur.



Şekil 7.2. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi.

Şekil 7.2'de -1 mm odak noktasında üç farklı kesme hızı (1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) ve üç farklı lazer gücünde (2200 W, 2400 W ve 2600 W) yapılan deneyler için yüzey pürüzlülük

sonuçları verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde yüzey pürüzlülük değeri 1,471 μm ölçülmüştür. -1 mm odak noktasında yapılan deneylerde kesme hızının (1500 mm/sn) ve lazer gücünün (2600 W) maksimum değere çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü % 51,19 oranında artarak 0,718 μm ölçülmüştür. Şekil 7.2’de 0,8 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde yüzey pürüzlülük değeri 1,978 μm olmuştur. Kesme hızının (1300 ve 1500 mm/sn’ye) ve lazer gücünün (2400 ve 2600W) çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü sırası ile % 7,88 (1,822 μm) ve % 23,26 (1,518 μm) oranlarında azalma olmuştur. 0,9 bar gaz basıncında yapılan deneylerde ise 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde 2,578 μm ile en yüksek yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Diğer deneylerde olduğu gibi kesme hızının (1300 ve 1500mm/sn’ye) ve lazer gücünün (2400 ve 2600 W) çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü azalarak 2,371 μm ve 2,029 μm olmuştur. Ayrıca Şekil 7.2’de yapılan bütün deneylerde gaz basıncının düzenli olarak (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) artırılması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde gözle görülür bir artma olmuştur. Örneğin; -1 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1500 mm/sn kesme hızında ve 2600 W lazer gücünde yüzey pürüzlülüğü 1,255 μm ölçülmüştür. Odak noktası, kesme hızını ve lazer gücünü sabit tutarak gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü %97,137 (2,029 μm) oranında artma olmuştur.

Lazerle Hardox 450 çeliğinin delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine önemli etkilere sahip olduğunu Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de görülmüştür. Sabit odak noktasında gaz basıncının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olurken, kesme hızının ve lazer gücünün artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni yüksek gaz basınçlarında delinen malzemenin yüzeyinden ergimiş metalin uzaklaştırılması sırasında daha derin olukların oluşacağı düşünülmektedir. Ayrıca, kesme hızının artması malzeme üzerinde ısıdan etkilenen bölgeyi düşürürken, lazer gücünün artması malzemenin ısıdan daha fazla etkilenmektedir ve bu da daha düzgün bir delme işleminin gerçekleştiği düşünülmektedir [55,56].

7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ

Yapılan çalışmada kullanılan her bir lazer işlemi için işleme parametresinin en iyi seviyelerinin bulunmasında sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılmıştır. Lazer delme deneyleri sonucu ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ile S/N oranları Çizelge 7.2’de verilmiştir. Yapılan lazer delme deneylerin sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinin düşük olması istenir. Bunun için S/N oranlarının hesaplanmasında Eş 1’de verilen en küçük en iyi denklemi kullanılır. Çizelge 7.2’deki veriler kullanılarak lazer kesme deneyleri sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra_{ort}) 1,839 µm ve ortalama S/N oranı -4,837 dB hesaplanmıştır.

Çizelge 7.2. Farklı kesme parametrelerinde yapılan lazer delme işleminde elde edilen Ra değerleri ve S/N oranları.

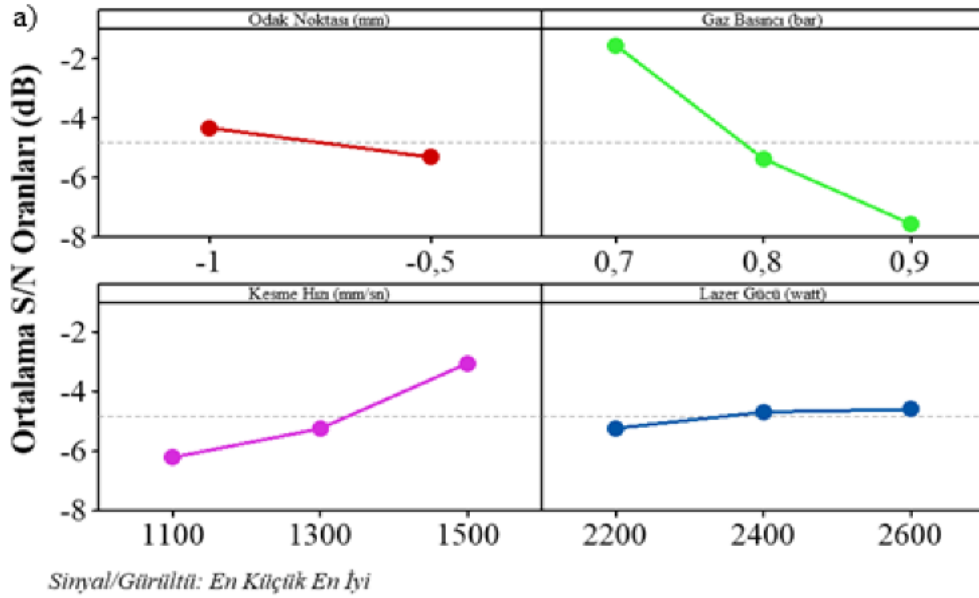
Deney No	Lazer Kesme Parametreleri				Ra (µm)	Ra-S/N (dB)
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)		
1		0,7	1100	2200	1,471	-3,35225
2		0,7	1300	2400	1,255	-1,97287
3		0,7	1500	2600	0,718	2,87751
4		0,8	1100	2200	1,978	-5,92453
5	-1	0,8	1300	2400	1,822	-5,21097
6		0,8	1500	2600	1,518	-3,62544
7		0,9	1100	2400	2,578	-8,22566
8		0,9	1300	2600	2,371	-7,49863
9		0,9	1500	2200	2,029	-6,14564
10		0,7	1100	2600	1,705	-4,63449
11		0,7	1300	2200	1,388	-2,84779
12		0,7	1500	2400	0,927	0,65841
13		0,8	1100	2400	2,108	-6,47741
14	-0,5	0,8	1300	2600	1,985	-5,95521
15		0,8	1500	2200	1,802	-5,11510
16		0,9	1100	2600	2,728	-8,71689
17		0,9	1300	2200	2,516	-8,01421
18		0,9	1500	2400	2,213	-6,89963

Çizelge 7.3’de verilen Ra değeri için S/N yanıt tablosu ve Şekil 7.3’de verilen ortalama S/N oranı grafiği verilmiştir. Çizelge 7.3’de ve Şekil 7.3’de en yüksek S/N oranı o işleme parametresi için en düşük seviyeyi vermektedir. Çizelge 7.3 ve Şekil 7.3 dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğü için en iyi parametreler -1 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1500 mm/sn kesme hızında ve 2600 W lazer

gücünde 0,818 μm olarak belirlenmiştir. Ayrıca Şekil 7.3.de yüzey pürüzlülüğü için lazer kesme parametrelerinin seviye değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.3. Lazer delme işlemi sonucu yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Lazer Kesme Parametreleri			
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)
Seviye 1	-4,342	-1,545	-6,222	-5,233
Seviye 2	-5,334	-5,385	-5,250	-4,688
Seviye 3		-7,583	-3,042	-4,592
Delta	0,992	6,038	3,180	0,641



Şekil 7.3. Lazer delme deneylerinde yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin S/N oranları grafiği.

7.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Lazer delme deneylerinde kullanılan kesme parametreleri kombinasyonu Taguchi L₁₈ dizinine göre hazırlanmıştır. Lazer kesme parametresi olarak odak noktası, gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin ortaya koymak amacıyla varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Varyans analizleri %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analizleri sonuçları

Çizelge 7.4'te verilmiştir. Çizelgede lazer kesme parametrelerinin çıktı parametreleri üzerine etki oranları sunulmuştur.

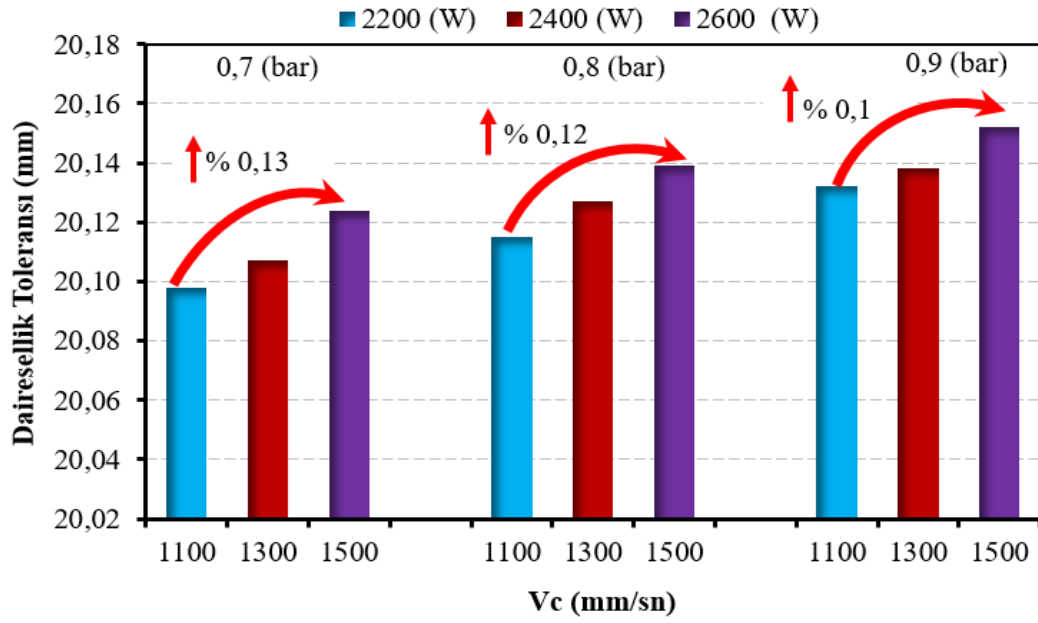
Sonuç olarak Çizelge 7.4'de yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkili faktörün % 77,17 ile gaz basıncının olduğu görülmektedir. Bunu sırası ile % 18,33 kesme hızı, % 2,81 odak noktası ve % 0,13 lazer gücü ile takip etmektedir.

Çizelge 7.4. Yüzey pürüzlülüğü için varyans analiz sonuçları.

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Odak Noktası (mm)	1	0,14797	0,14797	18,04	0,002	2,81
Gaz Basıncı (bar)	2	4,05728	4,05728	247,39	0,000	77,17
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,96381	0,96381	58,77	0,000	18,33
Lazer Gücü (W)	2	0,00662	0,00662	0,40	0,678	0,13
Hata	10	0,08200	0,08200			1,56
Toplam	17	5,25768				100

7.4. ÜST DELİK ÇAPLARI İÇİN ORTALAMA DAİRESELLİK TOLERANSININ LAZER KESME PARAMETRELERİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

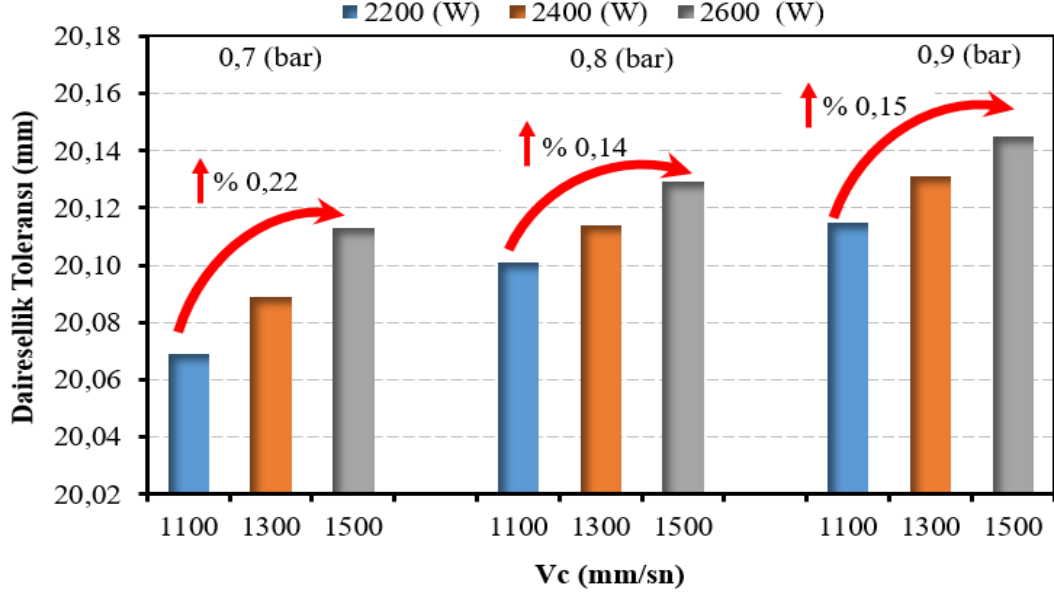
Mevcut çalışmada Hardox 450 malzemesi üç farklı kesme hızı (1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar), üç farklı lazer gücü (2200 W, 2400 W ve 2600 W) ve iki farklı odak noktası (-1 ve -0,5 mm) kullanılarak lazer delme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Lazer delme işlemleri sonucu oluşan deliklerin dairesellik toleransları her delik çevresinden alınan sekiz ölçüm ile belirlenmiştir.



Şekil 7.4. -0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı dairesellik toleransı değişimi.

-0,5 mm odak noktasında, 1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn kesme hızlarında, 0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar gaz basıncında ve 2200 W, 2400 W ve 2600 W lazer gücünde yapılan deneyler için deliklerin dairesellik tolerans değişimi Şekil 7.4’de verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,098 mm ölçülmüştür. Gaz basıncı sabit tutularak kesme hızının ve lazer gücünün sırası ile 1500 mm/sn ve 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,13 oranında bir artma olarak 20,124 mm ölçülmüştür. Şekil 7.4.’de gaz basıncının 0,7 bar’dan 0,8 bar çıkarılması ile 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,115 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,12 oranında bir artma olarak 20,139 mm olmuştur. Gaz basıncının 0,9 bara çıkarılması ile yapılan deneylerde ise 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,132 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 1300 ve 1500 mm/sn’ye ve lazer gücünün 2400 ve 2600 W çıkarılması ile delik çaplarında sırası ile % 0,03 ve % 0,1 oranlarında artarak 20,132 mm ve 20,152 mm olmuştur. Şekil 7.4’de yapılan bütün deneylerde gaz basıncının düzenli olarak (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) artırılması ile delik çaplarında artma olmuştur. Örneğin; -0,5 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,098 mm ölçülmüştür. Odak

noktasının, kesme hızını ve lazer gücünü sabit tutarak gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ile delik çapında %0,17 (20,132 mm) oranında artma olmuştur.



Şekil 7.5. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı dairesellik toleransı değişimi.

-1 mm odak noktasında, 1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn kesme hızlarında, 0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar gaz basıncında ve 2200 W, 2400 W ve 2600 W lazer gücünde yapılan deneyler için delik çaplarındaki değişim Şekil 7.5’de verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,069 mm ölçülmüştür. Gaz basıncı sabit tutularak kesme hızının ve lazer gücünün sırası ile 1500 mm/sn ve 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,22 oranında bir artma olarak 20,113 mm ölçülmüştür. Şekil 7.5’de gaz basıncının 0,7 bar’dan 0,8 bar çıkarılması ile 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,101 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,14 oranında bir artma olarak 20,129 mm olmuştur. Gaz basıncının maksimum değer olduğu 0,9 bar’da 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde üst delik çapı 20,115 mm ölçülmüştür. Sırası ile kesme hızının 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2400 W ve 2600 W çıkarılması ile yapılan deneylerde üst delik çaplarında sırası ile % 0,08 ve %0,15 oranlarında artma olmuştur. Şekil 7.5’de yapılan bütün deneylerde gaz basıncının düzenli olarak (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) artırılması ile delik çaplarında

artma olmuştur. Örneğin; -1 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,069 mm ölçülmüştür. Odak noktasının, kesme hızını ve lazer gücünü sabit tutarak gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ile delik çapında % 0,23 (20,115 mm) oranında artma olmuştur.

7.5. ÜST DELİKLER İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ

Lazer delme deneylerinde kullanılan deney kombinasyonları Taguchi'nin L₁₈ dikey dizinine göre hazırlanmıştır. Çizelge 7.5'de lazer delme deneyleri sonucunda elde edilen deliklerin çaptaki değişimler ile analiz sonucunda elde edilen S/N oranları verilmiştir. Delik çaplarındaki değişimin düşük olması istendiğinden sinyal-gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında Eş 1'de verilen en küçük en iyi denklemi kullanılır. Çizelge 7.5'deki veriler kullanılarak lazer delme deneyleri sonucunda ortalama üst deliklerin çaplarındaki değişim 20,1188 mm ve ortalama S/N oranı -26,072 dB hesaplanmıştır.

Çizelge 7.5. Farklı lazer kesme parametrelerinde yapılan lazer delme deneyleri sonucu üst delik çap değerleri ve S/N oranları.

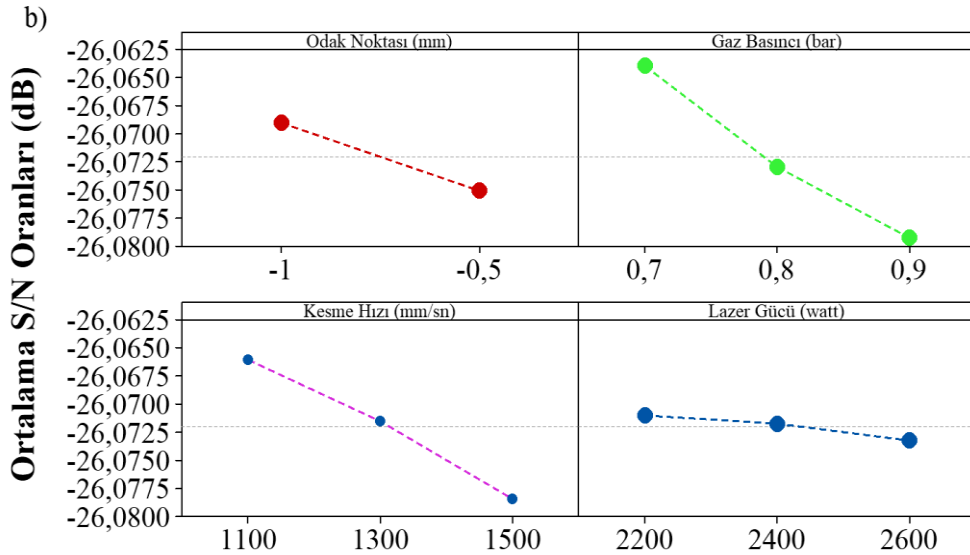
Deney No	Lazer Kesme Parametreleri				Üst Dairesellik (µm)	Üst Dairesellik -S/N (dB)
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)		
1		0,7	1100	2200	20,069	-26,0505
2		0,7	1300	2400	20,089	-26,0592
3		0,7	1500	2600	20,113	-26,0695
4		0,8	1100	2200	20,101	-26,0644
5	-1	0,8	1300	2400	20,114	-26,0700
6		0,8	1500	2600	20,129	-26,0764
7		0,9	1100	2400	20,115	-26,0704
8		0,9	1300	2600	20,131	-26,0773
9		0,9	1500	2200	20,145	-26,0833
10		0,7	1100	2600	20,098	-26,0631
11		0,7	1300	2200	20,107	-26,0669
12		0,7	1500	2400	20,124	-26,0743
13		0,8	1100	2400	20,115	-26,0704
14	-0,5	0,8	1300	2600	20,127	-26,0756
15		0,8	1500	2200	20,139	-26,0808
16		0,9	1100	2600	20,132	-26,0777
17		0,9	1300	2200	20,138	-26,0803
18		0,9	1500	2400	20,152	-26,0864

Üst delik çapları için Şekil 7.6'da ortalama S/N oranı grafiği ve Çizelge 7.6'da S/N yanıt tablosu verilmiştir. Bu şekil ve tabloda S/N oranının en yüksek olduğu değer o

kesme parametrelerine ait optimum değerleri göstermektedir. Şekil 7.6'da ve Çizelge 7.6'da üst delik çaplarının en iyi olduğu 20,069 mm delik çapı için en iyi kesme parametreleri odak noktasının -1 mm, gaz basıncının 0,7 bar, kesme hızının 1100 mm/sn ve lazer gücünün 2200 W olduğu tesbit edilmiştir.

Çizelge 7.6. Lazer kesme deneyleri sonucu üst delik çapları için S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Lazer Kesme Parametreleri			
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)
Seviye 1	-26,0690	-26,064	-26,066	-26,071
Seviye 2	-26,0751	-26,073	-26,072	-26,072
Seviye 3		-26,079	-26,078	-26,073
Delta	0,0060	0,015	0,012	0,002



Sinyal/Gürültü: En Küçük En İyi

Şekil 7.6. Üst delik çapları için lazer delme deneylerinde S/N oranı grafiği.

7.6. ÜST DELİKLER İÇİN VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Taguchi L_{18} ortogonal deney tasarımı kullanılarak kesme parametrelerinin etki oranları varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiştir. Odak noktası, gaz basıncı, kesme hızı, ve lazer gücünün üst delik çaplarındaki değişime etkilerinin analizi %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Üst delik çaplarındaki değişimleri üzerine etki eden kesme parametreleri ve etki yüzdeleri Çizelge 7.7'de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Lazer delme deneylerinde üst delik çapları için varyans analizi sonuçları.

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Odak Noktası (mm)	1	0,000882	0,000882	52,36	0,000	11,87
Gaz Basıncı (bar)	2	0,003819	0,003819	113,35	0,000	51,40
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,002476	0,002476	73,51	0,000	33,33
Lazer Gücü (W)	2	0,000083	0,000083	2,48	0,134	1,12
Hata	10	0,000168	0,000168			2,27
Toplam	17	0,007429				100

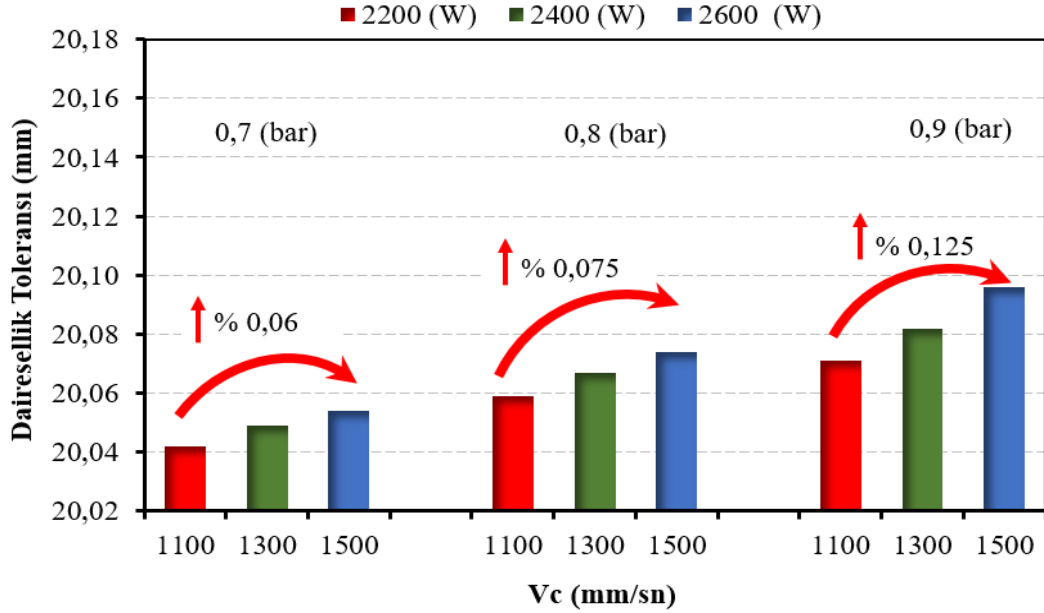
Çizelge 7.7’de üst delik çaplarındaki değişimler üzerine en etkili faktörün % 51,40 ile gaz basıncının olduğu görülmektedir. Bunu sırası ile % 33,33 kesme hızı, % 11,87 odak noktası ve 1,12 ile lazer gücü takip etmektedir.

7.7. ALT DELİKLER İÇİN ORTALAMA DAİRESELLİK TOLERANSININ LAZER KESME PARAMETRELERİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan çalışmada, Hardox 450 çeliğinin iki farklı odak noktası (-1 ve -0,5 mm), üç farklı kesme hızı (1100 mm/sn, 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) ve lazer gücünde (2200 W, 2400 W ve 2600 W) lazer delme deneyleri yapılmıştır. Lazer delme deneyleri sonucu alt deliklerindeki çap sapmaları her delikten alınan sekiz ölçümle belirlenmiştir. Lazer kesme parametreleri ile alt delik çaplarındaki sapmalar arasındaki ilişki Şekil 7.7 ve Şekil 7.8’de verilmiştir.

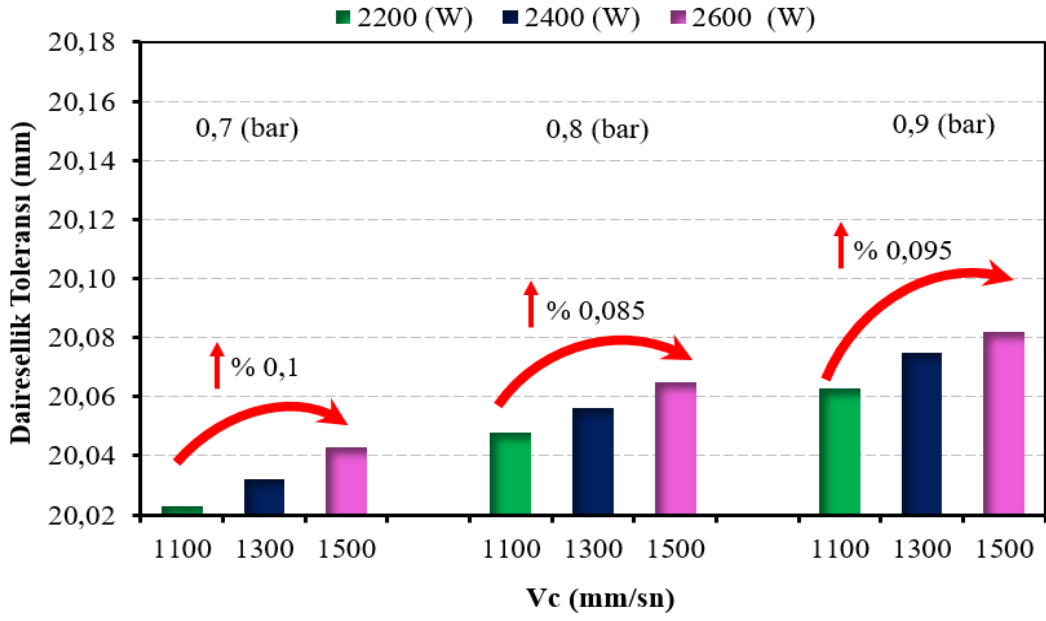
Şekil 7.7’de -0,5 mm odak noktasında farklı kesme hızlarında, gaz basıncında ve lazer gücünde yapılan deneyler için alt delik çaplarındaki değişim verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,042 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,06 oranında bir artışla 20,054 mm olmuştur. Gaz basıncının 0,8 bar çıkarılması ile 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,059 mm olmuştur. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında %0,075 oranında bir artışla 20,074 mm olmuştur. Gaz basıncının maksimum değer olduğu 0,9 bar’da 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde alt delik çapı 20,071 mm

ölçülmüştür. Sırası ile kesme hızının 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2400 W ve 2600 W çıkarılması ile yapılan deneylerde alt delik çaplarında % 0,06 (20,082 mm) ve % 0,125 (20,096 mm) oranlarında artma olmuştur.



Şekil 7.7. -0,5 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı alt delik çaplarındaki değişim.

Şekil 7.8'de -1 mm odak noktasında farklı kesme hızlarında, gaz basıncında ve lazer gücünde yapılan deneyler için alt delik çaplarındaki değişimler verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,023 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,1 oranında bir artışla 20,043 mm olmuştur. Gaz basıncının 0,8 bar çıkarılması ile 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde delik çapı 20,048 mm olmuştur. Kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,085 oranında bir artışla 20,065 mm olmuştur. Gaz basıncının maksimum değer olduğu 0,9 bar'da 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yapılan deneyde alt delik çapı 20,063 mm ölçülmüştür. Sırası ile kesme hızının 1300 mm/sn ve 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2400 W ve 2600 W çıkarılması ile yapılan deneylerde alt delik çaplarında % 0,06 (20,075 mm) ve % 0,095 (20,082 mm) oranlarında artma olmuştur.



Şekil 7.8. -1 mm odak noktasında kesme hızına, gaz basıncına ve lazer gücüne bağlı alt delik çaplarındaki değişim.

7.8. ALT DELİKLER İÇİN S/N ORANLARININ ANALİZİ

Lazer delme deneylerinde odak noktası, gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücü lazer kesme parametresi olarak seçilmiştir. Lazer delme deneylerinde kullanılan deney kombinasyonları Taguchi'nin L_{18} dikey dizinine göre belirlenmiştir. Çizelge 7.8'de lazer delme deneyleri sonucunda elde edilen delik çaplarındaki değişimler ile analiz sonucunda elde edilen S/N oranları verilmiştir. Deliklerin çaplarındaki değişim düşük olması istendiğinden sinyal-gürültü (S/N) oranının hesaplanmasında Eş 1'de verilen en küçük en iyi denklemi kullanılır. Çizelge 7.8'deki veriler kullanılarak lazer delme deneyleri sonucunda ortalama alt deliklerin çaplarındaki değişim 20,06 mm ve ortalama S/N oranı -26,0467 dB hesaplanmıştır.

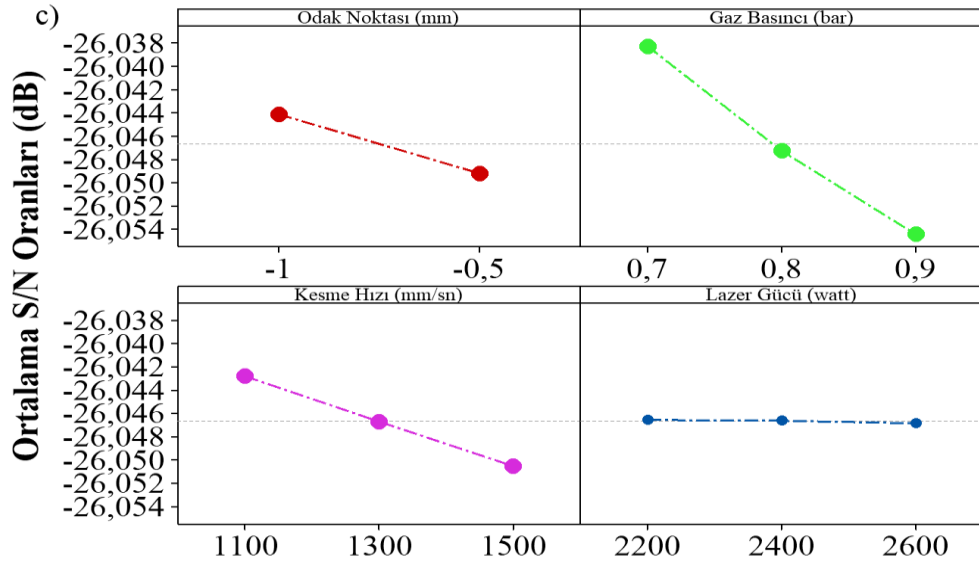
Çizelge 7.8. Farklı lazer kesme parametrelerinde yapılan lazer delme deneyleri sonucu alt delik çap değerleri ve S/N oranları.

Deney No	Lazer Kesme Parametreleri				Alt Dairesellik (μm)	Alt Dairesellik -S/N (dB)
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)		
1		0,7	1100	2200	20,024	-26,0310
2		0,7	1300	2400	20,032	-26,0345
3		0,7	1500	2600	20,043	-26,0393
4		0,8	1100	2200	20,048	-26,0414
5	-1	0,8	1300	2400	20,056	-26,0449
6		0,8	1500	2600	20,065	-26,0488
7		0,9	1100	2400	20,063	-26,0479
8		0,9	1300	2600	20,075	-26,0531
9		0,9	1500	2200	20,082	-26,0561
10		0,7	1100	2600	20,042	-26,0388
11		0,7	1300	2200	20,049	-26,0419
12		0,7	1500	2400	20,054	-26,0440
13		0,8	1100	2400	20,059	-26,0462
14	-0,5	0,8	1300	2600	20,067	-26,0496
15		0,8	1500	2200	20,074	-26,0527
16		0,9	1100	2600	20,071	-26,0514
17		0,9	1300	2200	20,082	-26,0561
18		0,9	1500	2400	20,096	-26,0622

Alt delik çapları için ortalama S/N oranı grafiği Şekil 7.9'da ve S/N yanıt tablosu Çizelge 7.9'da verilmiştir. Bu şekil 7.9 ve çizelge 7.9'da S/N oranının en yüksek olduğu değer kesme parametrelerine ait optimum değerleri göstermektedir. Şekil 7.9'da ve Çizelge 7.9'da alt delik çaplarının en iyi olduğu 20,024 mm delik çapı için en iyi kesme parametreleri odak noktasının -1 mm, gaz basıncının 0,7 bar, kesme hızının 1100 mm/sn ve lazer gücünün 2200 W olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.9. Lazer delme deneyleri sonucu alt delik çapları için S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Lazer Kesme Parametreleri			
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)
Seviye 1	-26,0441	-26,0382	-26,0428	-26,0465
Seviye 2	-26,0492	-26,0473	-26,0467	-26,0466
Seviye 3		-26,0545	-26,0505	-26,0468
Delta	0,0051	0,0162	0,0077	0,0003



Sinyal/Gürültü: En Küçük En İyi

Şekil 7.9. Alt delik çapları için lazer delme deneylerinde S/N oranı grafiği.

7.9. ALT DELİKLER İÇİN VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Deney parametreleri Taguchi L₁₈ ortogonal deney tasarımı kullanılarak belirlenmiştir. Deneyler sonucu kesme parametrelerinin etki oranlarının belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Alt delik çaplarındaki değişimler için odak noktası, gaz basıncı, kesme hızı, ve lazer gücünün etkilerinin analizi %95 güven seviyesinde yapılmıştır. Alt delik çaplarındaki değişimler üzerine etki eden kesme parametreleri ve etki yüzdeleri Çizelge 7.10'da verilmiştir.

Çizelge 7.10. Lazer delme deneylerinde alt delik çapları için varyans analizi sonuçları.

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
Odak Noktası (mm)	1	0,000624	0,000624	74,41	0,000	10,58
Gaz Basıncı (bar)	2	0,004236	0,004236	252,48	0,000	71,80
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,000954	0,000954	56,87	0,000	16,17
Lazer Gücü (W)	2	0,000001	0,000001	0,09	0,918	0,02
Hata	10	0,000084	0,000084			1,42
Toplam	17	0,005900				100

Çizelge 7.10'da alt delik çaplarındaki değişimler üzerine en etkili faktörün % 71,80 ile gaz basıncının olduğu görölmektedir. Bunu sırası ile % 16,17 kesme hızı, % 10,58 odak noktası ve %0,02 ile lazer gücü takip etmektedir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Lazer ile delme işleminde kullanılan kesme parametrelerinin seçimi kesme kalitesi açısından çok önemlidir. Bu deneysel çalışmada HARDOX 450 çeliğinin lazer ile delme işlemi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve delik çaplarındaki değişimler üzerine etkileri incelenmiştir. Taguchi L_{18} dikey dizinine göre yapılan deney tasarımına göre, lazer ile delme işlemleri sonucunda yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı için optimum parametreler belirlenmiş ve çıktı parametreleri üzerine en etkin kesme parametrelerinin belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Deneyler ve analizler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü $0,718 \mu\text{m}$ için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, $0,7 \text{ bar}$ gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en yüksek yüzey pürüzlülüğü $2,728 \mu\text{m}$ için kesme parametreleri $-0,5 \text{ mm}$ odak noktası, $0,9 \text{ bar}$ gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin parametre $\%77,17$ ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile $\%18,33$ kesme hızı, $\%2,81$ lazer gücü ve $\%0,13$ ile odak noktası takip etmiştir.

- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en küçük üst delik çapı 20,069 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en büyük üst delik çapı 20,152 mm için kesme parametreleri -0,5 mm odak noktası, 0,9 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu üst delik çaplarındaki değişim tamlık üzerine en etkin parametre %51,40 ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile %33,33 kesme hızı, %11,87 odak noktası ve %1,12 ile lazer gücü takip etmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en küçük alt delik çapı 20,024 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en büyük alt delik çapı 20,096 mm için kesme parametreleri -0,5 mm odak noktası, 0,9 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu alt delik boyutsal tamlık üzerine en etkin parametre %71,80 ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile %16,17 kesme hızı, %10,58 odak noktası ve %1,42 ile lazer gücü takip etmiştir.

8.2. ÖNERİLER

- Hardox 450 çeliğinin lazer ile delinmesinde farklı gazların kullanılması ile delme sırasında kullanılan gaz türlerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik boyutsal tamlıklarına etkileri incelenebilir.
- Üretim endüstrisinde aynı malzemedeki farklı kalınlıklarda kullanılmasından dolayı farklı kalınlıklara sahip iş parçasının yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik boyutsal tamlıklarına etkileri incelenebilir.

- Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından dolayı meydana gelen ITAB bölgeleri ve sertlik değişimleri incelenebilir.
- Yapılan alışma ile elde edilen yüzeyler SEM mikroskobu ile incelenerek numunelerin mikroyapı değişimleri gözlemlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Cebeci, R., “St-37 ve St-52 Sac Malzemelerin Lazerle Kesilmesinde İşleme Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük (2021).
2. Chen, S. L., & O'Neil, W., “The effects of power rippling on CO₂ laser cutting”, **Optics & Laser Technology**, 29(3) 125-134 (1997).
3. Cebeci, İ., “AISI 304-310-316-430 Paslanmaz Saclarin Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kerf Genişliği, Çapak Yüksekliği ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük (2021).
4. Eltawahni, H. A., Hagino, M., Benyounis, K.Y., Inoue, T., & Olabi, A. G., “Effect of CO₂ laser cutting process parameters on edge quality and operating cost of AISI316L”, **Optics & Laser Technology**, 44(4) 1068-1082 (2012).
5. Celalettin, Y., “Paslanmaz çelik malzemelerin fiber lazer kesiminde proses parametrelerinin optimizasyonu”, **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering**, 24(2) 685-696 (2019).
6. Durukan, Z., “Lazer ile Kesmede İş ve İşleme Parametrelerinin Geometrik ve Boyut Değişimlerine Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 122-171 (2010).
7. Toprak, M., “The effect of solid boronizing on the surface properties of Hardox 450 and Hardox HiTuf steels”, Yüksek Lisans Tezi, **Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Şanlıurfa (2019).
8. Topal, A., “Plazma Transfer Ark Kaynak Yöntemi Kullanılarak AISI 1020 Çelik Yüzeylerinin Hardox 450 + FeW ile Kaplanması ve Aşınma Dirençlerinin Tespit Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Adıyaman, 121s (2017).
9. Dubey AK, Yadava V, “Multi-objective optimisation of laser beam cutting process”, **Opt Laser Technol**, 40(3):562-570 (2008).
10. Rajaram, J. S., Cheraghi, H. S., “CO₂ laser cut quality of 4130 steel”, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 43, 351-358 (2003).

11. Ürgüplü, M., Köksal, M., “Lazer ile kesme işlemlerinde kesim kalitesine etki eden parametreler”, *International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, Valencia-Spain, 866-874 (2015).
12. Uslan, I., “CO₂ laser cutting: kerf width variation during cutting”, *J. Engineering Manufacture*, 219(8), 571-577 (2005).
13. Mert, F., Tunç, M., & Sur, G., “AISI 304 Çeliğinin Lazer ile Kesilmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi”, *In 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, (29-30), Baku-Azerbaijan (2017).
14. Lamikiz, A., de Lacalle, L. L., Sanchez, J. A., Del Pozo, D., Etayo, J. M., & Lopez, J. M., “CO₂ laser cutting of advanced high strength steels (AHSS)”, *Applied surface science*, 242(3-4), 362-368 (2005).
15. Yilbas, B. S., Shaukat, M. M., & Ashraf, F., “Laser cutting of various materials: Kerf width size analysis and life cycle assessment of cutting process”, *Optics & Laser Technology*, 93, 67-73 (2017).
16. Zaied, M., Bayraktar, E., Katundi, D., Boujbene, M., Miraoui, I., “Effect of laser cutting parameters on surface quality of low carbon steel (S235)”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 128-134 (2012).
17. Davim, J. P., Barricas, N., Conceicao, M., & Oliveira, C., “Some experimental studies on CO₂ laser cutting quality of polymeric materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3) 99-104 (2008).
18. Pandey, A. K., & Dubey, A. K., “Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet”, *Optics & Laser Technology*, 44(6) 1858-1865 (2012).
19. Arcan, A., “Lazer ışını ile metallerin kesilmesine etki eden parametrelerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, İzmir (2011).
20. Salem, H. G., Mansour, M. S., Badr, Y., & Abbas, W. A., “CW Nd: YAG laser cutting of ultra low carbon steel thin sheets using O₂ assist gas”, *Journal of materials processing technology*, 196(1-3) 64-72 (2008).
21. Choudhury, I. A., & Shirley, S., “Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation”, *Optics & Laser Technology*, 42(3) 503-508 (2010).
22. Durukan, Z., Motorcu, A., & Güllü, A., “AISI 304 çeliğini farklı geometrilerde lazerle kesmede parametrelerin boyutsal doğruluk üzerine etkilerinin modellenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3) (2014).

23. Matoug, K. S. A., “Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (hsla) çeliklerin lazerle kesilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kastamonu (2019).
24. Kulenovic, M., Begic, D., Cekic, A., & Jliedtner, J., “Laser cutting of tungsten alloy using nitrogen assist gas”, *Annals of DAAAM & Proceedings* (2010).
25. Kurt, M., Kaynak, Y., Bagci, E., Demirer, H., & Kurt, M., “Dimensional analyses and surface quality of the laser cutting process for engineering plastics”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3-4) 259-267 (2009).
26. Jarosz, K., Löschner, P., & Niesłony, P., “Effect of cutting speed on surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel”, *Procedia Engineering*, 149, 155-162 (2016).
27. Tanrıverdi, M. A., “Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa (2001).
28. Ghany, K. A., & Newishy, M., “Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd: YAG laser”, *Journal of Materials Processing Technology*, 168(3), 438-447 (2005).
29. Al-qaisy, S. J. S., “CO₂ gaz lazeri kullanılarak yüksek yoğunluklu polietilen (hdpe) boruların kesilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kastamonu (2019).
30. El-Taweel, T. A., Abdel-Maaboud, A. M., Azzam, B. S., & Mohammad, A. E., “Parametric studies on the CO₂ laser cutting of Kevlar-49 composite”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(9-10), 907-917 (2009).
31. Zhou, B. H., & Mahdavian, S. M., “Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser”, *Journal of materials processing technology*, 146(2), 188-192 (2004).
32. Madić, M., & Radovanović, M., “Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO₂ laser cutting of mild steel”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35(2), 103-110 (2013).
33. Patel, J. M., & Patel, D. M., “Parametric investigation in CO₂ laser cutting-Quality of hardox-400 materials”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(7), 5979-5984 (2011).
34. Uzungörür, M., “Inconel 718 sac malzemelerin lazer ile kesilmesinde işlem parametrelerinin etkilerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Eskişehir (2015).

35. Noor, M. M., Kadirgama, K., & Rahman, M. M., "Particle swarm optimisation prediction model for surface roughness", *International Journal of Physical Sciences*, 6(13), 3082-3090 (2011).
36. Kotadiya, D. J., Kapopara, J. M., Patel, A. R., Dalwadi, C. G., & Pandya, D. H., "Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5384-5390 (2018).
37. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., & Minutolo, F. M. C., "Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO₂ laser beam", *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 279-285 (2005).
38. Li, C. H., Tsai, M. J., & Yang, C. D., "Study of optimal laser parameters for cutting QFN packages by Taguchi's matrix method", *Optics & Laser Technology*, 39(4), 786-795 (2007).
39. Tahir, B. A., Ahmed, R., Ashiq, M. G. B., Ahmed, A., & Saeed, M. A., "Cutting of nonmetallic materials using Nd: YAG laser beam", *Chinese Physics B*, 21(4), 044201 (2012).
40. Tunç, M., "CO₂ Lazer Kesim Tezgâhlarında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük (2015).
41. İnternet: "Lazer nedir?", <http://www.diyadinnet.com/YararliBilgiler-1262> (2020).
42. Mungan C., "Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 32- 37 (2006).
43. Öner, U., "Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Aralığı ve Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14 (2008).
44. Metiner, H., "*Lazerin çalışma prensipleri*", Aselsan, Ankara, 1-3, 4-5 (1995).
45. Anık, S., Oğur, A., & Vural, M., "*Termik kesme teknolojisi*", GEV (1996).
46. Er, İ., "Karbon dioksit (CO₂) Lazerle Fiber Optik Yüzeylerinin Parlatılması ve Verim Hesapları", Yüksek Lisans Tezi, Fizik, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-32 (2005).
47. Yilbas, B. S., "Effect of process parameters on the kerf width during the laser cutting process", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 215(10), 1357-1365 (2001).
48. Karaaslan, A., "Lazer ile malzeme işlemleri", *Literatür Yayınları*, 1-218 (2009).
49. Ürgüplü, M., "Su jeti destekli lazer sisteminin işlem kalitesine etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2016).

50. Taş Y., “Lazer kesim tezgâhları için görüntü işleme tabanlı güvenlik ve kontrol sistemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Kayseri (2018).
51. Erdoğan, Ş., “Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 37-38, 41-98 (2007).
52. Gençdoğan, D., “AISI 430/HARDOX 450 çeliğinin nikel ara tabaka kullanılarak TIG çift taraflı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman (2020).
53. Akgün M, Yurtkuran H, Ulaş HB., “AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 75-81 (2020).
54. Özlü B, Akgün M, Demir H., “AA6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu”, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2) 151-158 (2019).
55. Stournaras A., Stavropoulos P., Salonitis K., Chryssolouris G., “An investigation of quality in CO₂laser cutting of aluminum”, *CIRP J Manuf Sci Technol* ;2(1):61-69 (2009).
56. Chen SL., “The effects of high-pressure assistant-gas flow on high-power CO₂ laser cutting”, *J Mater Process Technol*, 88(1-3):57-66 (1999).
57. İnternet: “Lazer Çeşitleri”, <https://www.turkchem.net/lazerlerin-endustriyel-uygulamalarindaki-son-gelismeleri.html> (2021).

ÖZGEÇMİŞ

Fulya ÇIRAKOĞLU, ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2014 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği bölümünde öğrenimine başlayıp 2019 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu Yüksek Lisans Programına devam etmektedir.