



**HARDOX 500 ÇELİĞİNİN LAZERLE
KESİLMESİNDE KESME GEOMETRİSİNİN VE
İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESİM KALİTESİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nihal EKSİLMEZ

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

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

**HARDOX 500 ÇELİĞİNİN LAZERLE KESİLMESİNDE KESME
GEOMETRİSİNİN VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESİM KALİTESİ
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Nihal EKSİLMEZ

**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**

Nihal EKSİLMEZ tarafından hazırlanan “HARDOX 500 ÇELİĞİNİN LAZERLE KESİLMESİNDE KESME GEOMETRİSİNİN VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESİM KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN 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. /07/2021

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan :

Üye :

Üye :

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.”

Nihal EKSİLMEZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HARDOX 500 ÇELİĞİNİN LAZERLE KESİLMESİNDE KESME GEOMETRİSİNİN VE İŞLEME PARAMETRELERİNİN KESİM KALİTESİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Nihal EKSİLMEZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Öğr. Gör. Dr. Barış ÖZLÜ

Temmuz 2021, 61 sayfa

Yapılan çalışmada, 6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin farklı kesme geometrilerinde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin (odak noktası, kesme hızı ve gaz basıncı) yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliğine etkisi incelenmiştir. Lazer kesme işlemi için deney tasarımı, Taguchi'nin L9 ortogonal dizisine göre yapılmıştır. Deneylerde kesme parametreleri olarak; üç farklı odak noktası (-0,5 mm, 0 mm ve 0,5 mm), üç farklı gaz basıncı (0,7 bar, 0,8 bar ve 0,9 bar) ve üç farklı kesme hızı (850 mm/s, 900 mm/s ve 950 mm/s) seçilmiştir. Taguchi yöntemine göre lazer kesme işleminde kullanılan kesme parametreleri optimize edildi. Ayrıca kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği üzerine etkilerinin belirlenmesi için varyans (ANOVA) analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; Hardox 500 çeliğinin lazerle kesilmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü düz kesimde

-0,5 mm odak noktasında, 0,9 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 2,099 µm ölçülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülüğü yay kesimde 0,5 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 4,795 µm ölçülmüştür. ANOVA analiz sonucu, yüzey pürüzlülüğü üzerine düz kesimde en etkin kesme parametresi %53,33 ile odak noktası iken, yay ve V kesim için en etkin parametre sırası ile %66,01 ve %58,33 ile gaz basıncı olmuştur. Lazerle düz, V ve yay kesimde sırası ile en düşük üst kerf genişliği sırası ile 5,06 mm, 5.12 mm ve 5.21 mm ölçülmüştür. Bu değerler için lazer kesme parametresi olarak -0,5 mm odak noktası, 850 mm/sn kesme hızı ve 0,7 bar gaz basıncı olarak belirlenmiştir. Üst kerf genişliği için ANOVA analizi sonucu, düz, V ve yay kesim için en etkin kesme parametresi sırası ile %50,21, %49,23 ve %49,21 odak noktası olarak belirlenmiştir. Düz, V ve yay kesim kesim geometrilerinde en düşük alt kerf genişlikleri sırası 5,02 mm, 5,07mm ve 5.13 mm ölçülmüştür. Alt kerf genişliği için ANOVA analizi sonucu, düz, V ve yay kesim için en etkin kesme parametresi sırası ile %51,18, %52,84 ve %50,80 odak noktası olmuştur.

Anahtar Sözcükler : Hardox 500, lazer kesim, kesme geometrisi, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği, optimizasyon.

Bilim Kodu : 91438

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT ON CUTTING QUALITY OF CUTTING GEOMETRY AND MACHINING PARAMETERS IN LASER CUTTING OF HARDOX 500 STEEL

Nihal EKSİLMEZ

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Halil DEMİR

Lecturer Dr. Barış ÖZLÜ

July 2021, 61 pages

In this study, the effects of cutting parameters (focal point, cutting speed and gas pressure) on surface roughness with top ve bottom kerf width were investigated in laser cutting of 6 mm thick Hardox 500 steel in different cutting geometries. The experimental design for the laser cutting process was made according to Taguchi's L9 orthogonal array. As the cutting parameters in the experiments; three different focal points (-0.5 mm, 0 mm and 0.5 mm), three different gas pressures (0.7 bar, 0.8 bar and 0.9 bar) and three different cutting speeds (850 mm/s, 900 mm/s and 950 mm/s) were

selected. The cutting parameters used in the laser cutting process were optimized according to the Taguchi method. In addition, variance (ANOVA) analysis was performed to determine the effects of cutting parameters on the surface roughness width of the top ve bottom kerf. As a result; In laser cutting of Hardox 500 steel, the lowest surface roughness was measured at -0.5 mm focal point, 0.9 bar gas pressure and 2.099 μm at a cutting speed of 950 mm/s in straight cut. The highest surface roughness was measured at 4.795 μm at 0.5 mm focal point, 0.7 bar gas pressure and 950 mm/sec cutting speed in arc cut. As a result of ANOVA analysis, while the most effective cutting parameter on surface roughness was the focus with 53.33% in flat cutting, the most effective parameter for arc and V cutting was gas pressure with 66.01% and 58.33%, respectively. The lowest top kerf widths were measured as 5.06 mm, 5.12 mm and 5.21 mm, respectively, in straight, V and arc cutting by laser. For these values, laser cutting parameters were determined as -0.5 mm focal point, 850 mm/sec cutting speed and 0.7 bar gas pressure. As a result of the ANOVA analysis for the top kerf width, the most effective cutting parameter for straight, V and arc cutting was determined as 50.21%, 49.23% and 49.21% focal point, respectively. The lowest rows of bottom kerf widths were measured as 5.02 mm, 5.07 mm and 5.13 mm in straight, V and arc cut cut geometries. As a result of the ANOVA analysis for the bottom kerf width, the most effective cutting parameters for straight, V and arc cutting were 51.18%, 52.84% and 50.80% focal points, respectively.

Key Word : Laser cutting, laser processing, cut quality, surface roughness, kerf width.

Science Code : 91438

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının oluőumunda büyük pay sahibi olan, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıėında őekillendiren danıőman hocam Prof. Dr. Halil Demir'e teőekkürlerimi sunarım.

Tez çalıőmam süresince değerli bilgilerini ve önerilerini esirgemeyen araőtırmamın her aőamasında, deney numunelerinin hazırlanmasından tez yazımı tamamlanana kadar bana yardımcı olan danıőman hocam Öğr. Gör. Dr. Barış ÖZLÜ' ye teşekkür ederim.

Numunelerin lazerle kesilmesinde desteğini esirgemeyen Kromlks Mutfak Cihazları İmalat ve Ticaret A.Ő.'ye teşekkür ederim.

ėrenim hayatımın ilk gününden bugüne kadar desteklerini, sevgilerini ve sabırlarını esirgemeyen çok değerli aileme teőekkürlerimi ve őükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	2
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	2
BÖLÜM 3	7
LAZER.....	7
3.1. LAZERİN TANIMI VE TARİHÇESİ	7
3.2. LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ	9
3.3. LAZER IŞINI ÖZELLİKLERİ	9
3.3.1. Tek Renklilik	10
3.3.2. Uyumluluk	10
3.3.3. Yoğunluk	10
3.3.4. Yönlendirilebilirlik	10
3.4. LAZER ÇEŞİTLERİ	11
3.4.1. Optik Pompalı Lazerler.....	11
3.4.2. Sıvı Lazerler.....	11
3.4.3. Boyar Maddeli Lazerler	11
3.4.4. Gaz Lazerler.....	12
3.4.5. Kimyasal Lazerler.....	12

	<u>Sayfa</u>
3.4.6. Dinamik Gaz Lazerleri	13
3.4.7. Yarı İletken Lazerler	13
3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI	13
3.6. LAZERLE KESİLEBİLEN FARKLI TÜRDEKİ METALLERİN ÖZELLİKLERİ	14
3.6.1. Endüstriyel Çelikler	14
3.6.2. Paslanmaz Çelik	14
3.6.3. Alüminyum	15
3.6.4. Titanyum	15
3.6.5. Bakır ve Pirinç	15
3.7. LAZER UYGULAMA ALANLARI	15
3.8. LAZERLE KESME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI	16
3.8.1. Lazerle Kesme İşleminin Avantajları	16
3.8.2. Lazerle Kesme İşleminin Dezavantajları	17
 BÖLÜM 4	 18
4.1. LAZER İLE KESME İŞLEMİ	18
4.2. LAZER KESME PARAMETRELERİ	19
4.2.1. Kesme Hızı	19
4.2.2. Odaklama Noktası	19
4.2.3. İşlem Gazı ve Gaz Basıncı	20
4.2.4. Lazer Gücü	20
4.3. KARBONDİOKSİT (CO ₂) LAZERİ	21
4.3.1. CO ₂ Lazer Tezgâhının Avantajları ve Dezavantajları	22
4.4. CO ₂ LAZER KESME TEZGÂHINDA KULLANILAN GAZLAR	22
4.4.1. Oksijen	22
4.4.2. Azot ve Argon	23
 BÖLÜM 5	 24
HARDOX ÇELİKLERİ	24
5.1. HARDOX ÇELİK TÜRLERİ	25
5.1.1. HARDOX 400 Serisi	25

	<u>Sayfa</u>
5.1.2. HARDOX 450 Serisi	25
5.1.3. HARDOX 500 Serisi	26
5.1.4. HARDOX 600 Serisi	26
5.1.5. HARDOX HiTuf Serisi	26
BÖLÜM 6	27
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME	27
6.2. DENEY DÜZENEGİ	27
6.3. DENEY TASARIMI	28
6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ	29
6.5. KERF GENİŞLİĞİ ÖLÇÜMÜ	30
BÖLÜM 7	31
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	31
7.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ	31
7.2. ÜST KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	36
7.3. ALT KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	44
BÖLÜM 8	53
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
8.1. SONUÇLAR	53
8.2. ÖNERİLER	56
KAYNAKLAR	57
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Lazer endüstriyel uygulama alanlarından bazıları	16
Şekil 4.1. Lazerle kesme işlemi	18
Şekil 4.2. CO ₂ Lazer tezgâhı.	21
Şekil 5.1. Kırma değirmeni	25
Şekil 6.1. Deney düzeneği.	28
Şekil 6.2. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	30
Şekil 6.3. ISM-PM200SA Dijital Mikroskop.....	30
Şekil 7.1. Düz kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	31
Şekil 7.2. V kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	32
Şekil 7.3. Yay kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.	33
Şekil 7.4. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.....	35
Şekil 7.5. Düz kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi.	37
Şekil 7.6. Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.	38
Şekil 7.7. V kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi.....	39
Şekil 7.8. V kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.....	39
Şekil 7.9. Yay kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi.	40
Şekil 7.10. Yay kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.....	41
Şekil 7.11. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre üst kerf genişliği için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.....	43
Şekil 7.12. Düz kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi.	45
Şekil 7.13. Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.	46
Şekil 7.14. V kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi.	47
Şekil 7.15. V kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.	47
Şekil 7.16. Yay kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi	48
Şekil 7.17. Yay kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.	49
Şekil 7.18. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre alt kerf genişliği için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Lazer gelişiminin tarihçesi	7
Çizelge 3.2. Bazı lazer türlerinin karşılaştırması.	14
Çizelge 6.1. Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 500 çeliğinin kimyasal birleşimi.	27
Çizelge 6.2. Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 500 çeliğinin mekanik özellikleri.	27
Çizelge 6.3. L9 lazer kesme parametreleri ve seviyeleri.	29
Çizelge 7.1. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tabloları.	34
Çizelge 7.2. Üst kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.	36
Çizelge 7.3. Üst kerf genişliği için S/N yanıt tabloları.	42
Çizelge 7.4. Üst kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.	44
Çizelge 7.5. Alt kerf genişliği için S/N yanıt tabloları.	50
Çizelge 7.6. Alt kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

mm/s : Kesme hızı

μm : Mikrometre

W : Watt

kW : Kilowatt

MPa : Megapascal

$^{\circ}\text{C}$: 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

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Lazer teknolojisinin son yıllardaki hızlı gelişimi lazer makinelerinin kullanım alanlarını oldukça artırmıştır. Lazer teknolojisi başlıca; askeri alanlarda, elektronik ve bilgisayar sektöründe, havacılık sektöründe, tıp biliminde, imalat endüstrisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1]. Mühendislik açısından incelendiğinde markalama, oyma, kesme, kaynak yapma, şekil verme gibi yüzey işleme teknikleri oldukça yaygın hale gelmiştir [2]. Lazer tezgahları takıma ihtiyaç duymaksızın, malzeme ile temas olmadan çapaksız ve hızlı işleme imkanı sunmaktadır. Temas olmayan doğasından dolayı lazer ile kesmede takım aşınması, takım depolama masrafı, takım ayarlama zamanı gibi maliyet artırıcı işlemler yoktur [3]. Farklı tipleri olmasına rağmen uygulamada en çok kullanılan lazer tipleri Nd: YAG ve CO2 lazerlerdir. CO2 lazer kızılötesi bölgede 10 µm dalga boyuna sahip olup, ışın gücü fazla, verimliliği iyi ve ışın kalitesi yüksektir [4]. Lazer ile kesme işlemi esnasında işlenen malzemede, ışın kalınlığından dolayı, bir kesme aralığı oluşmakta ve bu durum kesilen parçanın ölçü tamlığını etkilemektedir. Diğer taraftan, kesilecek parça üzerinde lazerin takip edeceği yol ve geometride farklı sapmaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, lazerle kesme işleminde istenilen ölçü toleransları içinde kesme yapılabilmesi için en uygun parametrelerin belirlenmesi ve parametre etkilerinin gözlemlenmesi gerekmektedir [5]. Hardox, aşınma direnci konu olduğu zaman ihtiyaç duyulan en üst düzeydeki beklentilere yanıt verebilen bir aşınma levhasıdır. Hardox tokluğu, düşük sıcaklıklardaki aşırı zorlanmalar gibi güç şartlar altında bile çok yüksek olması sıradan bir aşınma levhası olmadığına göstergesidir [6]. Hardox aşınma sacları aşınmaya, sürtünmeye ve darbelere karşı üst düzey koruma sağladığı ve konteynerler de sürekli olarak dış etkenler ile temas halinde oldukları için konteyner yapımında sıklıkla tercih edilir [6]. Bu çalışmada Hardox 500 çeliğinin lazer yöntemi ile kesilmesi incelenmiştir. Kesme parametrelerinin kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri araştırılmıştır.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tunç ve arkadaşlarının çalışmasında, paslanmaz çelik AISI 304 kalite malzeme numunelerinin en iyi kesme sonuçlarını verdikleri, güç, fokus, basınç, kullanılan gaz ve kesme hızı değerleri değerlendirilmiştir. Belirlenen değerlerin, kesme kalitesine olan etkileri grafiklerde çizilmiştir. Çalışmada, lazer kesim işlemlerinin etkinliğinin değerlendirilmesi yapılmış ve yüzey pürüzlülük değişimleri incelenmiştir. Kesilen yüzeyin kalitesi üzerinde fokus mesafesinin etkili olduğu belirtilmiş ve iş parçası malzemesine uygun optimum fokus mesafesinin belirlenmesi gerektiği bildirilmiştir. 304 kalite paslanmaz çeliğin, 1700 Watt lazer gücünde ve azot gazı altında yapılan kesme işleminde, ideal fokus mesafesinin 0 mm olduğu belirlenmiştir. Kesme hızının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en uygun kesme hızı 1600 mm/dak değerinde olduğu belirtilmiştir [7].

Uslan, bu çalışmada CO₂ yumuşak çelik lazer kesim olarak kabul edilir ve 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 [8].

Tanrıverdi'nin yaptığı çalışmada, maksimum kesme hızı lazer gücü ile artar ve sac kalınlığına, malzeme füzyon sıcaklığına ters orantılı olarak düşer. Kesme hızı için limit faktörler, önce lazer gücü, kesme aralığındaki gaz basıncı ve ısı iletimidir. Oksijen ile kesme, tavllanmış metalin üzerine oksijen gönderilerek malzeme ile oksijen arasında ekzotermik bir reaksiyon boşaltılarak gerçekleştirilir. Lazer ışını iş parçasının yüzeyine ısı kaynağı olarak uygulanmadan önce birçok dönüşüm geçirmek zorundadır.

Işın optik sistem tarafından yüzey üzerine odaklanır, sonuçta ortaya çıkan yüzeydeki ısı akışının moduna, optik sistemin karakteristiklerine ve iş parçasının ısıtılırken içinde bulunduğu atmosfere bağlıdır. Kesme hızındaki azalmayla ve kesme gazı basıncı artışıyla parçadaki ısıdan etkilenen bölge derinliği artmaktadır. Kesme hızındaki artmayla ve kesme basıncı artışıyla parçanın kesme yüzey kalitesi düşmektedir [9].

Stournaras ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, alüminyum alaşımlarının lazer kesimi için lazer gücü, tarama hızı, atım frekansı ve gaz basıncı gibi işleme parametrelerini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Hem kesme hızı hem de lazer gücü, kalite özellikleri ve özellikle çentik genişliği ve ısıdan etkilenen bölge üzerinde en güçlü etkiye sahiptir. Genel olarak, lazer gücünü artırarak ve kesme hızını düşürerek, çentik genişliğinin ve HAZ'ın artmasına neden olur. Lazer gücü ve kesme hızının, kesme kalitesinde en önemli rolü oynadığı bulunmuştur. Kerf genişliği ve ısıdan etkilenen bölge en çok lazer gücü ve kesme hızı parametrelerinden etkilenir. Lazer gücü kesme kenarının morfolojisinde önemli bir rol oynar çünkü düşük güç seviyelerinde lazer kesme işlemi daha az kararlıdır ve pürüzlü bir yüzey oluşturmuştur [10].

Ghany ve arkadaşı sürekli dalga modu ve puls modunda Nd: YAG lazer kullanarak 1.2mm östenitik paslanmaz çelik plakalarla bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, lazer puls frekansı, duty çevrimi, ortalama lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz çeşidi ve basıncının, kesme yüzeyine yapışan çapak oluşumuna, kesme aralığına, kesme yüzeyi pürüzlülüğüne, oyuk çizgileri oluşumuna ve ITAB'a etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda kesme hızı, darbe frekansı ve lazer gücünün kesme kalitesini etkilediği tespit edilmiştir [11].

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 [12].

Shirley ve arkadaşları çalışmalarında, CO2 Ana giriş lazer kesim parametrelerinin etkisinin değerlendirilmesi amacıyla polipropilen (PP), polikarbonat (PC) ve polimetil metakrilat (PMMA) olmak üzere üç polimerik malzemenin lazerle kesilmesi incelenmiştir. Polimerlerde lazer kesimin boyutsal doğrulukları, gerçek değerler nominal değerden boyutsal sapması ile incelenmiştir. Analizden, PMMA'nın daha az HAZ'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. Üç polimerik malzemenin tümü, farklı malzeme özelliklerine rağmen benzer çap hataları eğilimi göstermiştir [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].

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 [15].

Rajaram ve arkadaşları çalışmalarında, 4130 çelik numuneleri CO ile kesildi ve çentik eni, yüzey pürüzlülüğü, çizgi çizgi frekansı ve büyüklüğü ısıdan etkilenen bölge (HAZ) incelenmiştir. Test edilen çalışma, gücün HAZ'ın kerf genişliği ve boyutu üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, ilerleme hızı etkilerinin ise ikincil olduğu görülmüştür. Öte yandan, ilerleme hızından en çok yüzey pürüzlülüğü ve çizgi sıklığı etkilenmiştir. Güç, çentik genişliği üzerinde büyük bir etkiye sahipken, ilerleme hızı küçük bir rol oynamıştır. Düşük güç seviyelerinde, artan ilerleme hızı, çentik genişliğinde ve HAZ'da hafif bir azalmaya, yüksek güç seviyelerinde, artan ilerleme hızı, çentik genişliğinde daha büyük bir azalmaya ve HAZ'da hafif bir artışa neden olmuştur. İlerleme hızı, yüzey pürüzlülüğü ve şerit sıklığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Gücün yüzey pürüzlülüğü üzerinde küçük bir etkisi vardır [16].

Zaide 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 tahmin etmektedir. Sonuç olarak, kesme hızının yüzey kalitesine büyük bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır [17].

Arcan bu çalışmada, lazer kullanımında, lazer ışını elde etme süreçleri, kesme işlemlerinde kullanılan CO₂ lazer sisteminin sahip olduğu yapısı, lazer ışını ile yapılabilen farklı kesme işlemleri ve bunların etkileri hakkında çalışmalar yapmıştır. CO₂ lazeri kesme yönteminde kesme işlemini etkileyen parametreler vardır. Bu parametreler; lazer ışını odak noktası, kesme hızı, kesme gazı basıncıdır. Mevcut çalışmada, bu parametrelerin değiştirilmesi ile elde edilen numuneler kesim yüzeyleri, içyapıları ve sertlikleri bakımlarından karşılaştırılarak, parametrelerdeki değişimlerin etkileri tespit edilmiştir [18].

Eltawahni ve arkadaşları bu çalışmada, AISI316L paslanmaz çeliğin CO2 lazer ile kesilmesini incelenmişlerdir. 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 parametrelerin çalışmada belirtilen işlem parametreleriyle bağdaştırmaktadır [19].

Salem ve arkadaşları bu çalışmada, 1.2 mm kalınlığında ultra düşük karbonlu çelik saclar kullanmışlardır. İşlem esnasında Nd: YAG lazer kullanılmıştır. Lazer kesim parametreleri gaz basıncı, lazer gücü ve tarama hızıdır. Çalışma sonucunda, 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 koymuşlardır [20].

Gördebil, yaptığı çalışmada, LPG tanlarının üretilmesinde kullanılan P265 NB çeliklerinin MAG ve lazer yöntemleri ile yapılan birleştirilmesi işlemlerinde, lazer kaynağı kullanılması durumunda elde edilen avantajları araştırmıştır. Numuneler, karbondioksit lazerli tezgah ile, lazer kafasında yapılan değişiklikler sayesinde, alın bölgesinden lazer kaynağı ile birleştirilmiştir. Diğer numuneler ise, MAG kaynağı ile birleştirilmiştir. Her iki yöntemle de yapılan kaynaklama sonrası, numuneler mekanik ve metalografik olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, radyografik incelemelerde, lazerli kaynaklamalarda kaynak kusuru görülmezken, MAG kaynak yöntemiyle yapılan işlemlerde, birçok kaynak kusuruna rastlanmıştır. Sertlik ölçümlerinde ise, kaynak dikişi sertliği lazer kaynaklı numunelerde ana metalin sertlik değerinin 4'te 3ü üzerinde tespit edilirken, MAG kaynağı ile birleştirilen numunelerde %96 üzerinde bulunmuştur [21].

Kurt ve arkadaşları bu çalışmada, 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 etkisini araştırmışlardır. Mevcut çalışmada, örneklerin kesilen yüzey profili optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numunelerin yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülüğü ve form hatası ölçülerek incelenmiştir [22].

BÖLÜM 3

LAZER

3.1. LAZERİN TANIMI VE TARİHÇESİ

Lazer (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimesi uyarılan ışının yayılmasıyla ışığın yükseltilmesi, olarak tanımlanır [1]. Lazerin tarihi 1917 yılında, Amerikalı fizikçi Albert Einstein'la başlanmıştır. Einstein lazer düşüncesini, 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 sürecinin doğasını Einstein teorik olarak açıklamaya çalışmıştır [23]. Lazerin tarihsel gelişimindeki süreci Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Lazer gelişiminin tarihçesi [24].

LAZER GELİŞİMİNİN TARİHÇESİ		
Tarih	Adı	Başarılan
1916	Albert Einstein	Işık için yayılma teorisini geliştirmiş, Uyarılmış ışımaya kavramı
1928	Rudolph W Landenburg	Uyarılmış ışımamanın varlığının kanıtlanması ve negatif soğurma.
1940	Valentin A Fabrikant	Sayı yoğunluğu tersiniminin olma olasılığı.
1947	Willis E Lamb R C Retherford	Hidrojen spektrumunda indüklenmiş ışımaya şüphesi. Uyarılmış ışımamanın 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.

Çizelge 3.1. (devam ediyor).

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-ışınma 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 CO2 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.
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. LAZERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Lazer herhangi bir ortamda sahip olduğu elementin atomları, molekülleri veya iyonları çok farklı enerji düzeylerine sahiptir ve bu farklı enerji düzeyleri arasında iniş çıkışlar sergilerken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye zorlanabilir ve yayılan ışın uyarıcı ışıkla ilgili olur [3].

Elektron yerleşim düzeni, her elementin atom yapısına göre farklıdır ve ona özgüdür. Bu nedenle her elementin atomlarının kendine has kararlı bir yörüngesi bulunur. Yörüngelerinde kararlı olarak bulunan elektronların, dışarıdan gelen bir enerji ile uyarılıp bir üst yörüngeye çıkarılması ve sonra tekrar eski kararlı konumuna dönmesi sırasında, verilen enerjiyi tekrar dışarı verme işlemi lazerin çalışma prensibini oluşturmaktadır [3].

Eğer atomun dalga boyu, yani kısaca yaydığı ışının rengi kendisine uygun olmayan bir ışık dalga boyu ile uyarılırsa, enerjisini kendiliğinden ışık olarak yaymaktadır. Fakat gönderilen ışın kendisine tam olarak uygun bir ışın dalga boyunda ise, çok kısa bir zamanda yerleştirildiği ışın demeti ile aynı doğrultuda fakat daha parlak bir ışın demeti olarak ışınır. Bu durum yükseltilmiş ışınım olarak bilinir [3].

3.3. LAZER IŞINI ÖZELLİKLERİ

Lazer ışığının diğer ışıklardan farklı olması birçok nedene bağlıdır. lazeri diğerlerinden ayıran farklı özellikleri;

- Tek renkli olması
- Uyumlu olması
- Yoğunluğu
- Yönlendirilebilir olması

3.3.1. Tek Renklilik

Lazer ışığının en önemli özelliklerinden birisi tek renkli bir yapıda olmasıdır. Bu ışığın yalnızca tek bir dalga boyundan oluştuğu anlamına gelmektedir. Diğer kaynakların, yani bilinen ışık kaynaklarından örneğin bir ampülün yaydığı ışık ise, tek renkli değildir, bu tarz ışık kaynaklarından yayılan ışıkların prizmadan geçirilmesi durumunda birçok farklı renk kaynağı görülür [25].

3.3.2. Uyumluluk

Lazer haricindeki ışık ve ışın kaynaklarında elde edilen ışınlar aynı faza sahip değildir. Bunun anlamı, demetin içerisinde yer alan ışınların farklı fazlara sahip olmasıdır. Tabiatı gereği lazer ışınları uyum içerisindedir. Frekans, doğrultu ve faz değerleri aynı olan iki dalga, birbirine uyumlu dalgalar olarak ifade edilmektedir. Uyumlu olan bütün dalgalar ise, sinüsoidal olmakta ve belirli bir dalga boyu ve genliğe sahiptir [25].

3.3.3. Yoğunluk

Foton yayan atomlar, uyarılmış emisyon ile foton yayıyorsa, tüm fotonlar birbirine paralel olarak eş fazlı yayılım sağlamasından dolayı lazer ışığının yoğunluğu yüksek olmaktadır. Lazer kaynağında optik boşlukta, birbirini takip eden yansımaların sonucu lazer yoğunluğu artmaktadır. Lazerdeki ışın demeti çok yüksek ışık üretmektedir ve lazer dışındaki tüm ışık kaynakları lazere oranla zayıf kalmaktadır [26].

3.3.4. Yönlendirilebilirlik

Lazer ışığının en önemli bir başka özelliği ise, dağılmaz yapısı ve böylece kolaylıkla yön verilebilmesidir. Lazer kaynağında uyarılarak harekete geçirilen fotonlar belirli yönlerde hareketlerini gerçekleştirirler, diğer ışık kaynaklarında olduğu gibi dağılım sergilemezler. Bu özelliği lazer ışığının daha parlak olmasını sağlar. Lazer ışığının yönlendirilebilirlik özelliği sayesinde, fiber optik teknoloji geliştirilmiş ve birçok yeni haberleşme teknoloji keşfedilmiştir [26].

3.4. LAZER ÇEŞİTLERİ

3.4.1. Optik Pompalı Lazerler

Lazer ışık oluşması için atomların uyarılması ve yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından bir diğeri, lazer kaynağında kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek dğerde frekansa sahip ışık düşürülmesidir. Bu yöntem ise, optik pompalama olarak isimlendirilmiştir. Bu prosesin verimi düşük olması nedeniyle, güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi şarttır. Optik pompalama yapılan lazerlerde uygun malzemeden yapılmış bir çubuk yer alır ve bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel yapıda olacak şekilde parlatılmış ve lazer ışığının yansıyabilmesi için parlak ayna özelliği gösterecek şekilde kaplanmıştır. Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığının bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. Pembe yakut kullanılmıştır. Sonraları birçok toprak elementleri kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimdir. Bu tür lazerden çok güçlü ışık çakımları biçiminde binlerce wattlık güçler elde edilebilir [27].

3.4.2. Sıvı Lazerler

Katı lazerlerde, yüksek güç veya pompalama lambasının etisiyle oluşan yüksek sıcaklık zaman içerisinde kırılma gibi hasarlara neden olabilmektedir. Buna karşın, sıvı lazerlerde, saydam bir bölme içinde sıvı kullanılır ve soğutma sağlanır. Yapılan soğutma ile birlikte, çok daha yüksek güçler elde edilebilir hale gelmiştir. Ancak inorganik sıvıların bir çoğu lazerlerde kullanıma uygun değildir. [27].

3.4.3. Boyar Maddeli Lazerler

Bir kısım organik maddeler, flourasan özelliği nedeniyle, ışığa gösterebilir. Yani bunun anlamı, maddenin üzerine düşen ışığın farklı bir renkte malzemede ışımaya

neden olmasıdır. Boyar maddeler, daha geniş bir aralık içerisinde frekans ayarlanabilmesine olanak sağladığından tercih edilmektedir [27].

Örnek olarak, Rodamin 6G maddesi, başka bir lazer kaynağı ile uyarılması sonucu, lazer etkisi gösterebilmektedir. Yayıdığı ışık rengi, turuncu-sarı olan, Rodamin 6G, darbeli lazerlerden farklı olarak sürekli çalışan lazer kaynağının geliştirilmesinde kullanılmış boyarmaddedir. Bu sayede, frekans ayarlamasına olanak sağlayan ve sürekli lazer demetinin üretimine imkan veren bir lazer geliştirilmiştir. Metilumbelliferon da benzer şekilde bir boyarmaddedir. Bu madde, hidroklorik asitle karıştırılması durumunda, moröstesinden sarıya kadar uzanan bir aralıkta lazer etkisi göstermektedir, bu durum istenilen dalga boyunda lazer üretilmesini sağlamaktadır [27].

3.4.4. Gaz Lazerler

Gaz lazerlerde, gazlı boşalma yöntemi uygulanmaktadır ve bu yöntemde atomlar uyarılmış düzeylere geçerek, ışık yayarlar. Gaz lazerlerin en yaygın kullanım örneği, ışıklı neon lambalardır. Bu yöntemde, çok sayıda atom belirli enerji düzeylerinde birikme yapabilirler. Boşalmalı lambanın, her iki ucuna da ayna koyulursa, lazer etkisi görülecektir. Bu yöntem, çok seyrek koşullar altında oluşturulabilir ve ancak pek az dalga boyu için geçerlidir. Bununla birlikte, pek çok gaz türünde lazer etkisi oluşturulabilir. Bu yöntemle elde edilen lazer, idel bir doğru çizgiye oldukça yakın olması nedeniyle, inşaat sektöründe, istinad amaçlı kullanılmaktadır [3].

3.4.5. Kimyasal Lazerler

Kimyasal tepkimelerin bir kısmı, lazer etkisinin oluşmasına yetecek kadar yüksek enerjili atomların ortaya çıkmasını sağlayabilir. Örnek vermek gerekirse, hidrojen ve flourür, hidrojen flourür olarak tepkimeye girdiğinde, ortamdaki karbondioksit gazı ile birlikte lazer etkisini oluşturabilmektedir. Bu yöntemde, düşük oranlarda kimyasal maddeler kullanılarak yüksek enerjili lazerler elde edilebilir [1].

3.4.6. Dinamik Gaz Lazerleri

Gazların sıcaklık farklarından yararlanılan bu yöntemde, sıcak bir gazın hızla soğutulması esnasında, alçak enerji düzeylerinin birindeki molekül sayısı daha hızlı azalmakta ve yüksek bir enerji düzeyindeki molekül sayısının altındaki değerlere düşebilmektedir. Bu süreç esnasında lazer etkisi ortaya çıkmaktadır. Bu koşul, yanmakta olan ve azotla karıştırılmış karbon monoksitin bir nozülden tahliyesinde, ani genişleme yaşamasıyla sağlanmaktadır. Bu tarz lazerlerde, otuz bin watt değerinden daha yüksek güç değerleri elde edilebilir [1].

3.4.7. Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerde farklı türlerden katkıları kullanılan iki farklı yarı iletken madde düz bir şekilde yan yana dizilir. Böyle düzenekten yüksek değerde geçirilecek bir elektrik akımı, malzemelerin eklem noktalarından lazer ışığı üretir. Bu yöntemde üretilen lazerin çıkış gücü sınırlıdır ancak, boyutları küçük ve verimlilikleri yüksek olması nedeniyle, telefon, televizyon, mesafe ölçümü vb gibi cihazlarda kullanılmaktadır [3].

3.5. BAZI LAZER TÜRLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Çizelge 3.2’de CO₂, Nd: YAG ve Excimer lazerlerinin çeşitli parametreler bakımından karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı lazer türlerinin karşılaştırması.

Karşılaştırma	CO ₂ Lazeri	Nd: YAG Lazeri	Excimer Lazeri
Dalga Boyu (µm)	10,6	1,6	0,3-0,2
Tahrik Tekniği	Düşük Basınçlı Gaz Boşaltımı	Ark Lambası	Yüksek Basınçlı 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. LAZERLE KESİLEBİLEN FARKLI TÜRDEKİ METALLERİN ÖZELLİKLERİ

3.6.1. Endüstriyel Çelikler

Endüstriyel çelik türlerinin kesilmesi işlemlerinde, kesme gazı olarak oksijen gazı kullanılmaktadır. Lazer kesim tezgahı sürekli ışın seçeneğinde kullanılarak kesme işlemi yapılır. Bu tarz çeliklerde, karbon oranı yüksekse, kesilen kenarlarda malzeme sertleşme gösterir. Bu durum aynı zamanda köşelerde yanık izlerinin de oluşmasına neden olur. Sertleşmenin kesme hızıyla ilgili bulunmamaktadır. Alaşım oranı yüksek olan malzemelerde ise, kesme işlemi düşük alaşımlı malzemelere oranla daha zordur [3].

3.6.2. Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çeliklerin kesilmesi esnasında kullanılacak gazlar, karbondioksit, azot ve helyum gazları olabilir. Kalınlıkları benzer seçilen paslanmaz çeliklerin kesilmesinde yüksek basınçlı azot, oksijen veya havaya kıyasla daha iyi yüzey kalitesi ve daha yüksek kesme hızı uygulanmasını mümkün kılar. Paslanmaz çeliklerin kesilmesinde,

her kalınlık için farklı odak mesafeleri seçilmesi gerekir. Oksijen ve havanın kesme esnasında kullanılması durumunda, ölçü tamlığı ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilemeyebilir [28].

3.6.3. Alüminyum

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının lazer ile kesiminde 5-15 bar basıncında azot kullanılarak çapaksız ve düzgün bir kenar elde edilmektedir. Malzemenin yüksek ısı iletici katsayısı ve lazer ışınının yüzeyden yansması nedeni ile alüminyumun kesiminde CO2 lazerinin kullanılması zordur. Malzeme kalınlıkları arttıkça alüminyum ve alaşımlarının lazerle kesim hızları azalmaktadır [29].

3.6.4. Titanyum

Titanyumda en uygun kesme gazı bir soy gaz olan argondur. Fakat azot da kullanılabilir. Kesim gazı olarak oksijen kullanılmaz. Oksijen ile yapılmak istenirse titanyum yüksek sıcaklıkta yanar [30].

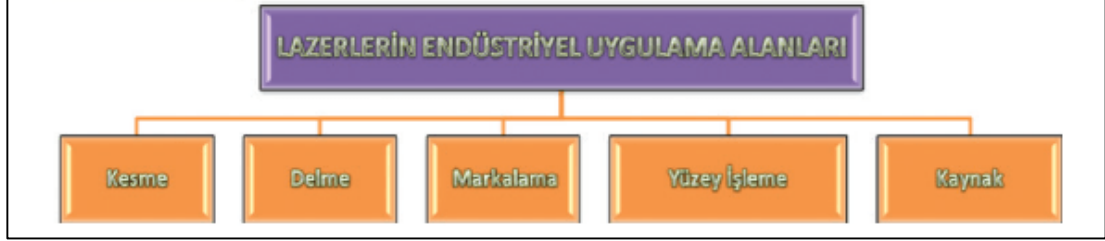
3.6.5. Bakır ve Pirinç

Bakır, CO2 lazer ışını için çok yüksek bir yansıtma kapasitesine sahiptir. Bakırın nispeten yüksek ergime sıcaklığı ve üstün termal iletkenliği bakırlı malzemelerin lazerle kesilmesini olumsuz etkiler. Genellikle kesme gazı olarak oksijen kullanılmaktadır fakat ancak bu yöntemle de ancak ince plakaların kesilmesi mümkündür. CO2 lazeri ile çok ince bakır levhaların kesilmesi mümkündür [29].

3.7. LAZER UYGULAMA ALANLARI

Lazerler; endüstride, bilimsel araştırmalarda, haberleşmede, tıp ve askeri alanlarda gün geçtikçe daha da önemli olmaktadır. Endüstride, her türlü malzemeyi çok hassas bir şekilde kesme, delme ve kaynak işlemlerinde, mikro elektronikte dirençlerin aktif veya pasif olarak %0,01 hassasiyetinde üretilmeleri, çip üretiminde hat kalınlıklarının 0,25 µm'den az olarak desenlendirilmesi, yüksek ve uzun yapıların düzgünlüğünün

ölçümü, yeni maddelerin analiz işlemlerinin yapılması, yüzey sertleştirme gibi birçok alan ve sektörde kullanılmaktadır [1].



Şekil 3.1. Lazer endüstriyel uygulama alanlarından bazıları [31].

3.8. LAZERLE KESME İŞLEMİNİN AVANTAJLARI VE DEZAVANTAJLARI

3.8.1. Lazerle Kesme İşleminin Avantajları

- Lazer ile kesme temassız bir işlemdir. Bunun sonucu olarak kesme kuvveti ve takım aşınması yoktur ve parçanın bağlanması oldukça basittir.
- Malzeme sertliği kesme için ya da etkili kesme hızı için sınırlayıcı değildir. Bilinen kesme işlemleri sırasında sertlikleri ile güçlü çıkaran malzemeler lazer ile kesmede herhangi bir problem çıkarmazlar.
- Kesim kalitesi mükemmel yakındır. Bu mükemmelliği sağlayan kriterler ışın çapının sabit ve oldukça dar olması, bununla birlikte seri üretimde bile 0,05 mm gibi düşük tolerans değerlerine inilebilmesidir.
- Kesim hızı yüksektir. Bu üretim işlemini büyük ölçüde hızlandırır.
- Yüksek enerji yoğunluğuna bağlı olarak ısıdan etkilenen bölge çok küçük ve sınırlıdır. Isıdan etkilenen bölgenin küçük olması demek malzeme bozunumunun minimum düzeyde olması demektir.
- Kesim yüzeyi pürüzlülüğü çok azdır. (100 μm 'den küçük) Kesim işleminden sonra iş parçasına ek bir işlem yapmak gerekmez.
- Yaygın şekilde kullanılan çelikler çapak oluşturulmaksızın kesilebilir. Bu nedenle çapak temizleme problemi yoktur.

- Dar kesmelerle malzemenin çok daha az miktarı göç ettirildiğinden malzemenin kayıp oldukça azdır. Böylece efektif malzeme kullanımı mümkündür.
- Lazer ve lazer kesme teknolojisindeki hızlı gelişmeler göz önünde bulundurularak, ticari olarak lazerle kesim diğer tekniklere karşı bir alternatif olarak görülmekte, uygulamalarda sınırsız esneklik sağlaması yönünden geleneksel yöntemler yerine tercih edilmektedir [32].

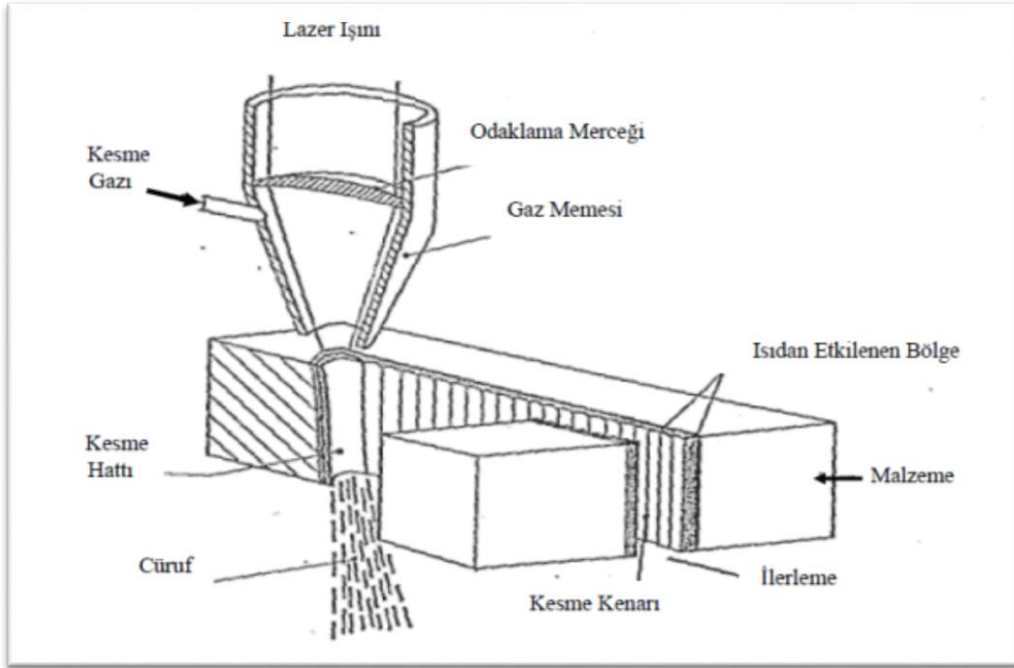
3.8.2. Lazerle Kesme İşleminin Dezavantajları

- Detaylı bir imalat planı gereklidir.
- Pahalı bir yatırım gerektirir.
- Tezgâhın saat ücreti yüksektir.
- Konvansiyonel tezgâhlar ile kıyaslandığında daha titiz kullanım ve bakım isterler.
- Kesme hızları yüksek ve kaliteli kesicilerin kullanılması gerekir.
- Periyodik bakımları uzman ve yetkili kişiler tarafından düzenli olarak yapılmalıdır [33].

BÖLÜM 4

4.1. LAZER İLE KESME İŞLEMİ

Lazer ile kesim aslında bir ısıl işlemdir. Bu kesimde lazer ışını, ısı kaynağı yani kesici görevini yapmaktadır. İyi bir kesimin elde edilebilmesi için lazer ışınının malzemeye tam olarak nüfuz etmesi gerekir. Böylece eriyen malzeme dışarı atılarak yapışması engellenir. Lazer rezonatörde oluşan paralel lazer ışınları lenslere yönlendirilir. Daha sonra ışın malzeme yüzeyine odaklanıp, doğrultulur [34].



Şekil 4.1. Lazerle kesme işlemi [35].

4.2. LAZER KESME PARAMETRELERİ

4.2.1. Kesme Hızı

Lazer kesme işlemlerindeki enerji dengesi iki parçaya ayrılmaktadır. Bir kesme meydana getirmek için enerji kullanılır ve kullanılan enerji kesme bölgesinden uzaklaşır. Bu da göstermektedir ki, kesmede kullanılan enerji, kesmeyi gerçekleştirmek için gereken zamandan bağımsızdır. Fakat kesme bölgesinden olan enerji kaybı harcanan zamanla orantılıdır. Kesme bölgesinden olan enerji kaybı kesme hızının artmasıyla azalır. Kalın malzeme kesiminde kesme hızındaki azalma, kayıp enerjide artmaya ve işlemin etkinliğinin düşmesine yol açar. Çoğu metalde meydana gelen termal iletkenliğe bağlı ısı kayıpları, malzeme kalınlıklarındaki artma ve kesme hızlarındaki azalma ile hızlıca artar. Kesme hızı, lazer gücü ve gaz akış oranı ile dengelenmelidir. Kesme hızının artmasıyla kesme kenarında oluşan şeritler daha da belirginleşir, kesme kenarı altında cüruf biriktirme artar ve nüfuziyet azalır. Yumuşak çelik keserken oksijen kullanıldığında, düşük kesme hızlarında, kesme kenarlarında aşırı yanmalar meydana gelir. Bu da kenar kalitesini düşürür ve ısıdan etkilenen bölgeyi (ITAB) genişletir. Genellikle malzemeler için kesme hızları malzemenin kalınlığı ile ters orantılıdır. Hız, keskin köşe kesimlerdeki yanmalardan kaçınmak için azaltılmalıdır [36].

4.2.2. Odaklama Noktası

Odak noktası çoğu zaman malzeme yüzeyinde veya yüzeyin altında olacak şekilde ayarlanır. Bu noktaların dışında güç yoğunluğu etkili bir kesme için yetmeyecek kadar azalabilir. Bu yüzden odak pozisyonu kesme için önemli bir parametredir. En iyi pozisyon kesilecek malzemenin kalınlığı ile yakından ilgilidir. İnce malzemeler için (yaklaşık olarak 5mm) genellikle yüzeyde odaklama yapılır. Böylece en dar kesme genişliğine ve en ideal kesme hızına ulaşılır. Kalın malzemeler veya ergitildiğinde viskoz olan malzemeler için odak noktası genellikle malzeme yüzeyinin 2-3mm altında veya üstünde odaklanır. Bu kesme genişliğinin büyümesine neden olur ancak böylece uygun hızlarla ergimiş malzemenin yüzeyden kolayca uzaklaştırılmasını sağlar [32].

4.2.3. İşlem Gazı ve Gaz Basıncı

İşlem gazının seçimi, lazer kesim işleminin kalitesi ve üretimde çok önemli bir etkiye sahiptir. Yaygın olarak kullanılan gazlar, avantaj ve dezavantajları ile birlikte oksijen (aktif gaz) ve nitrojendir (inert gaz). Tamamen atıl olmamasına rağmen, nitrojen ucuz olması sebebiyle yaygın bir şekilde atıl gaz olarak kullanılır. Saf atıl gaz olan argon ve helyum gazları titanyum kesiminde kullanılır. Çünkü bu gazlar oksitlenmeyi ve kırılğan titanyum nitrürlerinin oluşumunu önler. Nitrojen gazı, kerf aralıklarından uzaklaştırmak için daha yüksek basınç gerektirdikleri için paslanmaz çelik, alaşımlı çelik, alüminyum ve nikel alaşımlarının kesiminde kullanılırlar. Yüksek gaz basıncı ergimiş malzemeyi kerf aralığından uzaklaştırmak için ekstra mekanik bir kuvvet sağlar. Yüksek basınçlı nitrojenli kesim paslanmaz çelik kesmede kullanılır. Bunun nedeni parlak ve oksitsiz bir kesme kenarı ortaya koymasıdır. Fakat oksijen kullanılarak yapılan kesimden daha düşük kesme hızları ile işleme gerçekleştirilir. Atıl gaz ile yapılan kesimlerde asıl problem, yeniden katılaştıran ergimiş metalin kerf aralığında çapaklar oluşturmasıdır. Çapaksız ve pürüzsüz kesim bazı işleme parametrelerinin optimize edilmesiyle başarılır; ağızlık çapı, odak pozisyonu ve gaz basıncı. Nitrojen 10-20 bar civarında bir basınç ortaya koyar ve basınç gereksinimi malzeme kalınlıklarının artmasıyla artar. Nitrojen gazının saflığı %99,8 civarlarında olmalıdır. Oksijen genellikle düşük alaşımlı çelik yumuşak çeliklerin kesilmesinde kullanılır. Oksijen kullanımı, kesit kalınlıklarının 12 mm'nin üzerinde olduğu ve yüksek kesme hızları için yüksek kesme gücü gerektiren işlemlerde ekzotermik bir reaksiyona sebep olur. Fakat oksijenli kesim, kesim kenarlarında oksitlenmeye sebep olur. Kenar pürüzlülüğü ve cüruf yapışmasını minimuma indirmek için işlem parametrelerinin çok dikkatli kontrol edilmesi gerekmektedir. Oksijen gazı ağızlık basıncı genellikle 0.5-5 bar arası bir basınçta tutulur. Oksijen basıncı levha kalınlıkları arttığında yanma olayından kaçınmak için azaltılır ve ağızlık çapı artırılır [36].

4.2.4. Lazer Gücü

Lazer gücünün miktarı kesme kalitesi açısından son derece önemlidir. Lazer oluşumuna başlandıktan sonra sabit bir çıkış gücü elde edilebilmek için 5-10 dakikaya

ihtiyaç vardır. Bu olaya geçici güç değişmezliği denir, sıcaklıktan ve gaz basıncından bağımsızdır [27].

4.3. KARBONDİOKSİT (CO₂) LAZERİ

Bu lazer türü endüstride kesme, markalama ve kaynak işlemlerinde oldukça fazla kullanılmaktadır. Karbondioksit lazeri, endüstrideki en yüksek çıkış gücüne sahiptir. Elektronların gerilime maruz kalmasıyla yüksek olmayan basınçlı bir gaz dolaşımı tutuşur. Elektron darbeleri sonucu nüfus terslemesi olayı meydana gelir. Bu terslenme olayı için karbondioksit gazı dışında azot ve helyum gazları gereklidir. Elektron darbeleri ile karbondioksitin uyarılması ya da azot ve karbondioksit molekülleri arasındaki darbelerle meydana gelir. Azot ile karbondioksit molekülleri arasındaki, darbelerle uyarma daha çok kullanılır. Azotun yüksek konsantrasyonu ve uzun ömürlü olmasından dolayı enerji bakımından, karbondioksit üst bir lazer 13 seviyesine ulaştırılabilir. Bu moleküllerin darbelenmesiyle enerji transferi meydana gelir. Diğer bir gaz olan helyum gazı ise; darbe boşalması esnasında alt lazer seviyesini hızla boşaltıp, yüksek ısıl iletkenliğiyle gaz karışımını soğutup, alt seviyenin de termik bir yüklemeye maruz kalmasını sağlar [37].



Şekil 4.2. CO₂ Lazer tezgâhı [38].

Genel olarak, metalleri kesmek için kullanılan karbondioksit lazerleri metal olmayan malzemelere göre çok daha yüksek güç seviyeleri gerektirir. Karbondioksit lazeri ile kesilebilen malzemeler üç ana gruba ayrılmaktadır:

- Demirli metaller: Hafif çelik
- Demir olmayan metaller: Alüminyum, titanyum ve diğer metal alaşımları
- Metal olmayan: Ahşap ve türevleri, Kağıt ve türevleri, Akrilik plastikler deri, kumaş, duvar kağıdı ve benzeri ürünler, yiyecek ve bitkiler [39].

4.3.1. CO₂ Lazer Tezgâhının Avantajları ve Dezavantajları

Avantajlar;

- Malzemenin mekanik özelliklerinden bağımsız olması: Yani gevreklik tokluk sertlik gibi özelliklerden bağımsızdır.
- Kısa işleme zamanı: Yüksek hızlarda kesim yapabilmektedir.
- Hassas işleme: Mikron derecesinde hatalarla kesme 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

Dezavantajlar;

- Bakım ve ilk yatırım maliyetinin yüksek olması.
- Isıl işlemde kaynaklanabilecek malzemedeki kimyasal değişimler, bozulmalar
- Sınırlı kalınlık/çap oranı ($H/D=10$) [34].

4.4. CO₂ LAZER KESME TEZGÂHINDA KULLANILAN GAZLAR

4.4.1. Oksijen

Lazerle yakarak kesme işleminde kullanılan oksijen, kesilen malzeme ile egzotermik reaksiyona girer ve bu reaksiyonun ürettiği ek ısı, kesme hızını artırır. Oksijenin saflığı kesme kalitesine, cüruf birikimine ve çapak oluşumuna büyük etki yapar. Oksijenin saflığındaki örneğin %99,97'den %99,5'e bir azalma, lazer ışınıyla yakarak

kesme işleminde kesme hızında önemli oranda bir düşüşe neden olur. Oksijen ne kadar saf ise, kesme de o derece hızlı olur. Ancak oksijenin saflığı %99,5'tan fazla olsa bile, havadaki azotun veya nemin difüzyonu, boru hattının sızdırması, uygun şartlarda olmayan hortumların veya armatürlerin kullanımını nedeniyle saflığı düşebilmekte bu da kesmen kalitesini düşürerek cüruf birikimine neden olmaktadır [5].

4.4.2. Azot ve Argon

Lazerle eriterek veya buharlaştırarak kesmede, erimiş veya buharlaşmış malzemenin kesme boşluğundan uzaklaştırabilmesi için, soy veya düşük reaksiyon hızına sahip gazların kullanılması gerekir. Bu gazlar için en uygunları argon ve azottur. Bu gazlar, kesme kanalında yanma oluşumunu engellemekte ve kesme yüzeylerinin oksit içermemesini sağlamaktadır. Dolayısıyla lazerle yakarak kesmedeki gibi kesme yüzeylerinin sonradan işlenmesine gerek olmamaktadır [5].

BÖLÜM 5

HARDOX ÇELİKLERİ

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. Aşınma sonucunda makine elemanlarının parçalarında meydana gelen hacimsel ve boylamsal azalış, makine elemanın randımanlı çalışmasını sınırlayarak verimini azaltıp zaman içerisinde bozulmasına neden olmaktadır. Aşınmanın önlenmesi ya da asgari düzeye indirilebilmesi için uygun malzeme tasarımının yanı sıra yüksek tokluk, iyi bir mukavemet ve kabul edilebilir düzeyde bir sertlik için ilk tercih edilen çeliklerin arasında iyi bir aşınma direnci olan malzemeler tercih edilmelidir [40].

Hardox, aşınma direnci söz konusu olduğunda, ihtiyaç duyulan en üst düzeydeki beklentilere yanıt verebilmektedir. 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 [6]. 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 minimal düzeyde tutulabilir ve bu hem ürün hem de çevre açısından büyük avantajlar sağlamaktadır [6]. Hardox tokluğu, düşük sıcaklıklardaki aşırı zorlanmalar gibi güç şartlar altında bile çok yüksek olması sıradan bir aşınma levhası olmadığının göstergesidir. Bu durum özellikle Hardox’u darbelere karşı güçlü kılmaktadır. Bu durumlar, çeliğin uygun bileşimi ve optimize edilmiş bir üretim prosesinin neticesidir [41].



Şekil 5.1. Kırma değirmeni [42].

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 [40].

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, sıklığın 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 [6].

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 [6].

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 kesilebilir ve kaynaklanabilir kabiliyeti sebebiyle yüksek mukavemet uygulamaları için tercih edilen bir çeliktir [40].

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 [40].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmada Hardox 500 çeliğinin lazer kesme işleminde kesme şekli ve kesme parametrelerinin (kesme hızı, basınç ve odak noktası) yüzey pürüzlülüğü ile alt ve üst kerf genişliği üzerine etkileri incelenmiştir. Lazer kesme işlemleri için yüzey pürüzlülüğü ile alt ve üst kerf genişliği için optimum kesme parametreler belirlenmiş ve çıktı parametreleri üzerine en etkin kesme parametrelerinin belirlenmesi için varyans analizi yapılmıştır.

6.1. DENEYLERDE KULLANILAN MALZEME

Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 500 çeliği 190x160x6 mm ebatlarında ticari olarak temin edilmiştir. Hardox 500 çeliğinin kimyasal birleşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 verilmiştir.

Çizelge 6.1. Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 500 çeliğinin kimyasal birleşimi.

Malzeme Cinsi	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
HARDOX 500	0.27	0.50	1.60	0.025	0.010	1.20	0.25	0.25	0.005

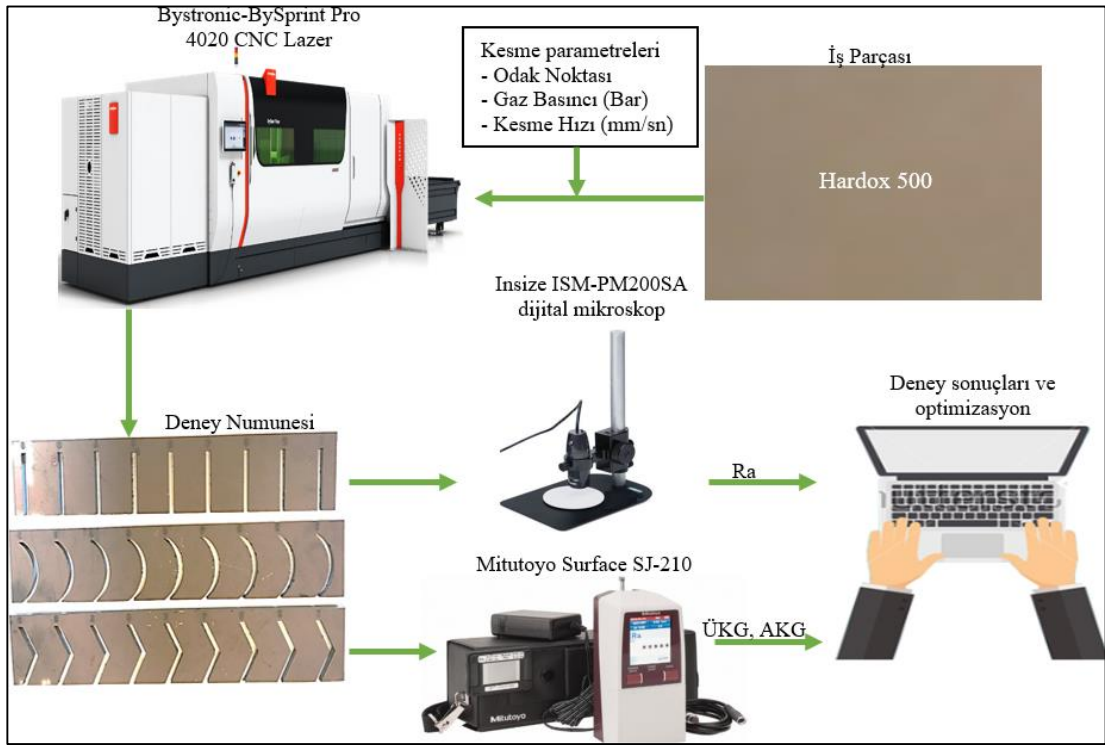
Çizelge 6.2. Yapılan çalışmada kullanılan Hardox 500 çeliğinin mekanik özellikleri.

Çekme mukavemeti (MPa)	1550
Akma mukavemeti (MPa)	1300
Sertlik (HB)	420-540

6.2. DENEY DÜZENEGİ

Lazer kesme deneyleri, Bystronic- BySprint Pro 4020 marka CNC lazer kesim tezgâhı kullanılmıştır. CNC lazer kesim tezgâhının eksenler arası çalışma mesafesi X=4,064 mm, Y=2,032 mm ve Z=70 mm, ayrıca pozisyonlama sapması $\pm 0,1$ mm ve tekrarlama

hassasiyeti $\pm 0,05$ mm'dir. Lazer kesme işlemlerinde Oksijen (O_2) gazı kullanılmıştır. Lazer ışınının çıkış noktası olan nozzle çapı 1 mm ve lens çapı 38,04 mm olarak seçilmiştir. Lazer kesme işlemlerinde elde edilen numunelerin üst ve alt kerf genişliklerinin ölçümünde 200X büyütme kapasiteye sahip olan Insize (ISM-PM200SA) marka dijital stereo mikroskop kullanılmıştır. Kesme boyunca yapılan 5 ölçümün aritmetik ortalamasıyla alt ve üst kerfgenişlikleri belirlenmiştir. Lazer kesme deneyleriyle elde edilen numunelerin Ra ölçümleri Mitutoyo Surftest SJ-210 model yüzey pürüzlülük test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Kesilen numunelerin karşılıklı yüzeyleri simetrik olduğu için her iki yüzden beşer ölçümün aritmetik ortalamaları hesaplanarak Ra değeri belirlenmiştir. Şekil 6.1'de verilen şematik deney düzeneği izlenerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 6.1. Deney düzeneği.

6.3. DENEY TASARIMI

Taguchi yöntemi, ürün maliyetini ve üretim zamanını düşürmek yanı sıra ürün kalitesini artırmak için deney tasarımı ve sonuçların analizini düzenli olarak sunan istatistiksel bir yöntemdir. Yapılan çalışmada numunelerin farklı kesme geometrilerinde

kesilebilmesi için kesme parametrelerinin farklı kombinasyonlarda oluşturmak için deney tasarımının hazırlanmasında Taguchi L9 deney tasarımı kullanılmıştır. Lazer kesme işleminde ürün kalitesini doğrudan etkileyen yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği optimum seviyeye indirmek gerekmektedir. Bunun için yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği doğrudan etkileyen lazer kesme parametrelerini optimize edilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada, Taguchi yönteminde kalite karakteristiği olarak yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği S/N oranları kullanılarak optimize edilmiştir. Her kesme geometrisi için odak noktası, gaz basıncı ve kesme hızı lazer kesme parametresi olarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan lazer kesme parametreleri ve seviyeleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. L9 lazer kesme parametreleri ve seviyeleri.

Kesme parametreleri	Sembol	Seviye 1	Seviye 1	Seviye 1
Odak Noktası (mm)	A	-0,5	0	0,5
Gaz Basıncı (Bar)	B	0,7	0,8	0,9
Kesme Hızı (mm/sn)	C	850	900	950

Yapılan çalışmada lazer kesme işleminde düşük kerf genişliği istendiği için sinyal/gürültü analizi için “en küçük en iyi” yöntemi kullanılmıştır. Değerlerin hesaplanmasında Eşitlik 6.1’de verilen en küçük en iyi denklemi kullanılmıştır. Kesme parametrelerinin her bir seviyesi için S/N oranları hesaplanmıştır [43,44].

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

6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÖLÇÜMÜ

Lazer kesme işlemi sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümü Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülük test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinin ölçümlerinde yüzey pürüzlülük cihazının örnekleme uzunluğu 0,8 mm ölçme uzunluğu 5,6 mm olarak belirlenmiştir. Lazer kesme sonrası numunelerinin karşılıklı yüzeyleri simetrik olduğu için her yüzeyden beş ölçüm yapılarak toplam on ölçümün aritmetik ortalaması ile yüzey pürüzlülüğü (Ra) hesaplanmıştır. Deneylerde

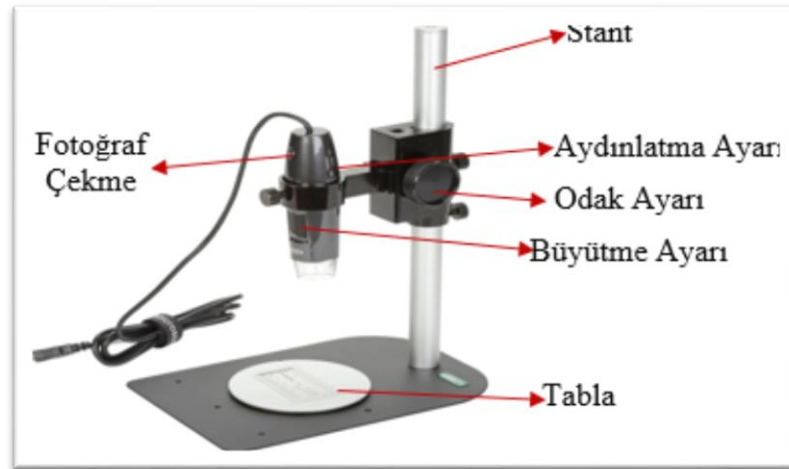
yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde kullanılan Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazının görseli Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2. Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

6.5. KERF GENİŞLİĞİ ÖLÇÜMÜ

Lazer kesme işlemlerinde incelenmesi gereken önemli çıktı parametrelerden olan üst ve alt kerf genişliğinin incelenmesi son derece önemlidir. Bunun için üst ve alt kerf genişliği ölçümü kesme boyunca beş farklı noktadan yapılmıştır. Bu beş ölçümün aritmetik ortalaması alınarak üst ve alt kerf genişliği belirlenmiştir. Kerf genişliğinin ölçümünde Şekil 6.3’de verilen Insize modeli ISM-PM200SA olan dijital mikroskop kullanılmıştır.



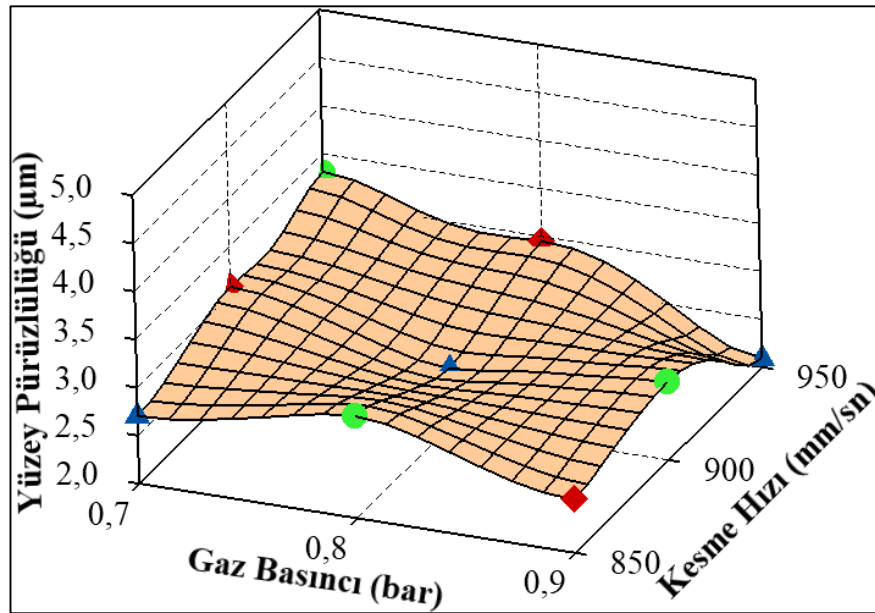
Şekil 6.3. ISM-PM200SA Dijital Mikroskop.

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

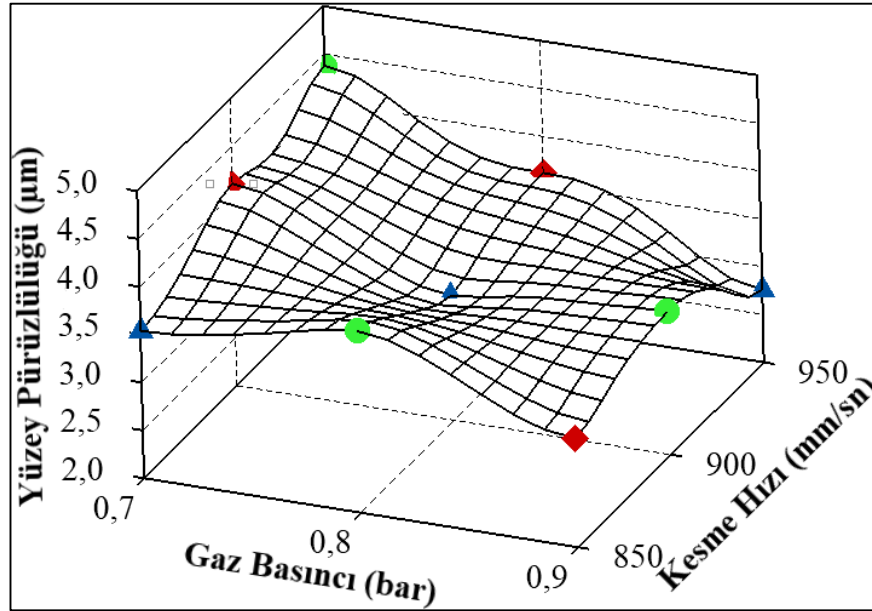
Yapılan çalışmada 6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin üç farklı kesme hızı (850, 900 ve 950 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7, 0,8 ve 0,9 bar) ve üç farklı odak noktası (-0,5, 0 ve 0,5 mm) kullanılarak düz, V ve yay biçiminde kesilmiştir. Şekil 7.1'de farklı kesme parametrelerde düz kesim yapılan iş parçasının kesme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi verilmiştir.



Şekil 7.1. Düz kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi. (▲: -0,5 mm, ●: 0 mm, ◆: 0,5 mm).

Şekil 7.1'de lazerle düz kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızında ve 0,7 bar gaz basıncında yüzey pürüzlülüğü 2,704 µm ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla yüzey

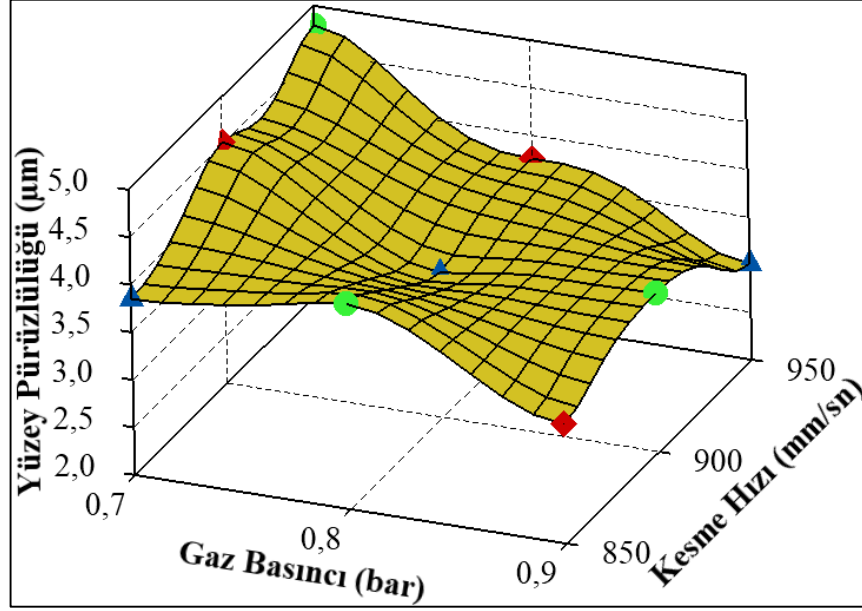
pürüzlülüğü yaklaşık %22,49 oranında azalarak 2,096 μm ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 3,082 μm olmuştur. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %17,09 oranında azalarak 2,555 μm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 3,312 μm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %15,16 oranında azalarak 2,810 μm ölçülmüştür.



Şekil 7.2. V kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi. ▲ : -0,5 mm ● : 0 mm ◆ : 0,5 mm).

Şekil 7.2’de lazerle V kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızında ve 0,7 bar gaz basıncında yüzey pürüzlülüğü 3,538 μm ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %22,10 oranında azalarak 2,756 μm ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 4,112 μm olmuştur. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %23,69 oranında azalarak 3,138 μm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında yüzey

pürüzlülüğü 4,378 μm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %20,10 oranında azalarak 3,498 μm ölçülmüştür.



Şekil 7.3. Yay kesimde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi. (▲ : -0,5 mm, ● : 0 mm, ◆ : 0,5 mm).

Şekil 7.3’de lazerle yay kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında yüzey pürüzlülüğü 3,849 μm ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %21,82 oranında azalarak 3,009 μm ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 4,532 μm olmuştur. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %28,13 oranında azalarak 3,257 μm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında yüzey pürüzlülüğü 4,795 μm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle yüzey pürüzlülüğü %23,52 oranında azalarak 3,667 μm ölçülmüştür.

Çizelge 7.1’de Taguchi metodu kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için elde edilen optimum odak noktası, gaz basıncı ve kesme hızı değerleri için lazer kesme

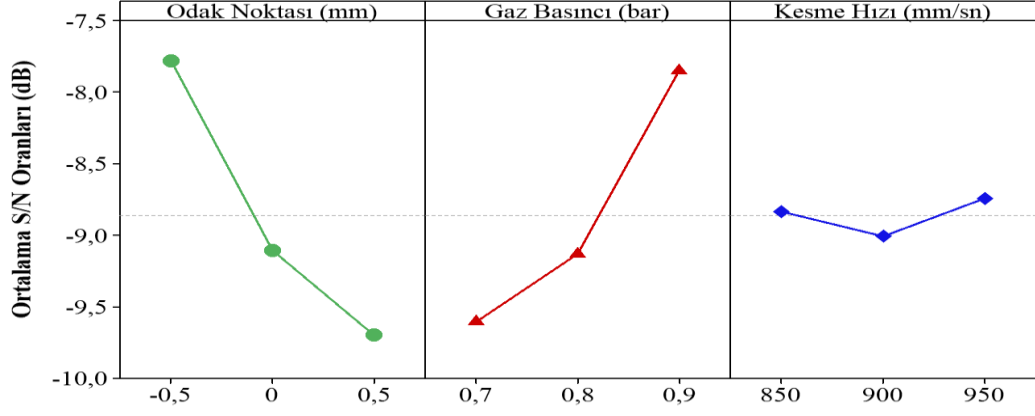
parametrelerinin optimum seviyelerini göstermektedir. Düz kesim için ideal kesme parametreleri seviyeleri odak noktası -0,5 mm (seviye 1), gaz basıncı 0,9 bar (seviye 3) ve kesme hızı 950 mm/sn (seviye 3) olmuştur. V ve Yay kesim için ideal kesme parametreleri seviyeleri odak noktası -0,5 mm (seviye 1), gaz basıncı 0,9 bar (seviye 3) ve kesme hızı 850 mm/sn (seviye 1) olarak belirlenmiştir.

Çizelge 7.1. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tabloları.

Düz Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-7,780	-9,606	-8,836
2	-9,107	-9,131	-9,008
3	-9,700	-7,849	-8,743
Hata	1,920	1,757	0,266
Toplam	1	2	3
V Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-10,05	-12,027	-10,910
2	-11,129	-11,123	-11,178
3	-11,840	-9,872	-10,935
Hata	1,787	2,156	0,268
Toplam	2	1	3
Yay kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-10,74	-12,82	-11,45
2	-11,62	-11,60	-11,78
3	-12,43	-10,37	-11,56
Hata	1,69	2,45	0,34
Toplam	2	1	3

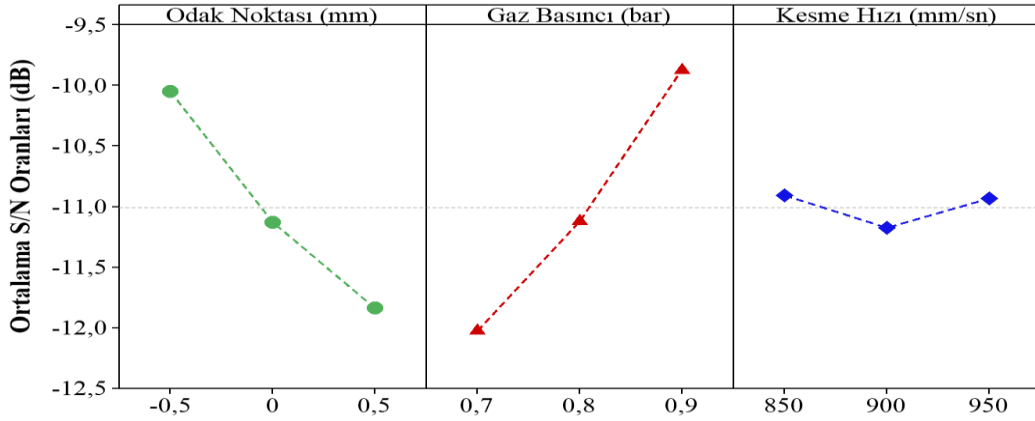
6 mm kalınlığındaki Hardox 500 farklı geometrilerde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü oranları Şekil 7.4'de verilmiştir. Sinyal/gürültü analizi yapılırken “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi”, “nominal en iyi” olmak üzere üç farklı analiz yöntemi kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada lazer kesme işleminde düşük yüzey pürüzlülüğü istendiği için sinyal/gürültü analizi için “en küçük en iyi” yöntemi kullanılmıştır. Sinyal/gürültü oranında "Sinyal" istenen değeri temsil ederken "Gürültü" istenmeyen değeri temsil etmektedir. Böylelikle yapılan deneylerde optimum kesme parametreleri S/N oranının en büyük olduğu yerde elde edilmektedir. Şekil 7.4 (a), (b), (c)'de düz, V ve yay kesimde S/N değerlerinin en yüksek çıktığı lazer kesme parametreleri odak noktası -0,5 mm, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 950 mm/sn olmuştur.



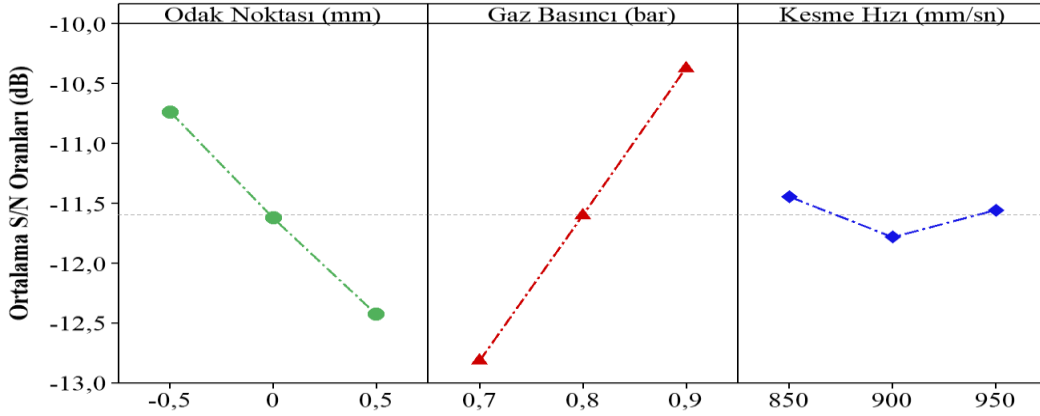
Sinyal/Gürültü: En Küçük En İyi

(a)



Sinyal/Gürültü: En Küçük En İyi

(b)



Sinyal/Gürültü: En Küçük En İyi

(c)

Şekil 7.4. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre yüzey pürüzlülüğü için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.

6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin farklı geometrielerde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin etkilerinin belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Çizelge

7.2’de varyans analizi sonuçları verilmiştir. Çizelge 7.2’de düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %53,33, %45,15 ve %0,47 olmuştur. V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %40,25, %58,56 ve %0,95 olarak belirlenmiştir. Yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %31,41, %66,01 ve %1,35 olmuştur.

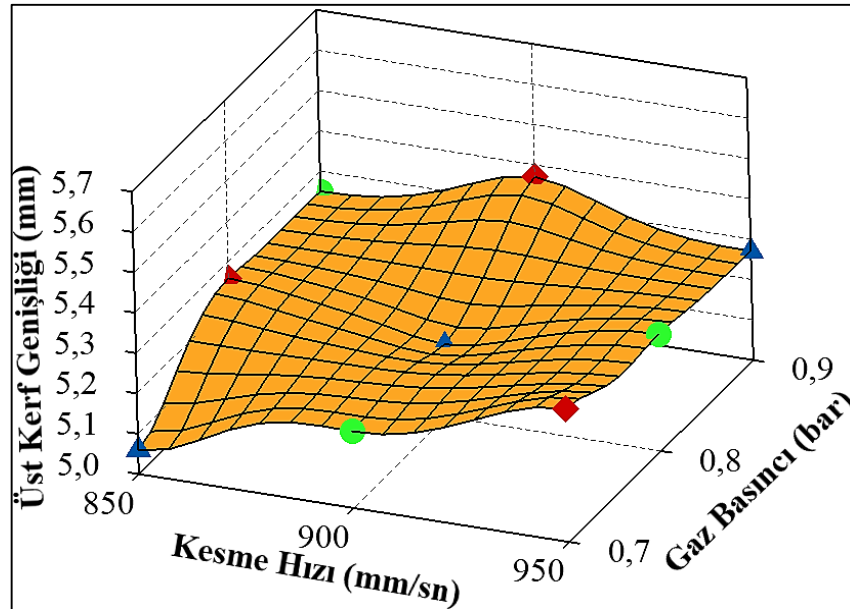
Çizelge 7.2. Üst kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.

Düz Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,55605	53,33	0,278023	51,13	0,019
Gaz basıncı (bar)	2	0,47074	45,15	0,235372	43,28	0,023
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,00489	0,47	0,002446	0,45	0,690
Hata	2	0,01088	1,04	0,005438		
Toplam	8	1,04256	100			
V Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,79788	40,25	0,398942	171,39	0,006
Gaz basıncı (bar)	2	1,16089	58,56	0,580446	249,37	0,004
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,01885	0,95	0,009427	4,05	0,198
Hata	2	0,00466	0,23	0,002328		
Toplam	8	1,98229	100			
Yay Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,83590	31,41	0,41795	25,56	0,038
Gaz basıncı (bar)	2	1,75690	66,01	0,87845	53,72	0,018
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,03599	1,35	0,01800	1,10	0,476
Hata	2	0,03271	1,23	0,01635		
Toplam	8	2,66150	100			

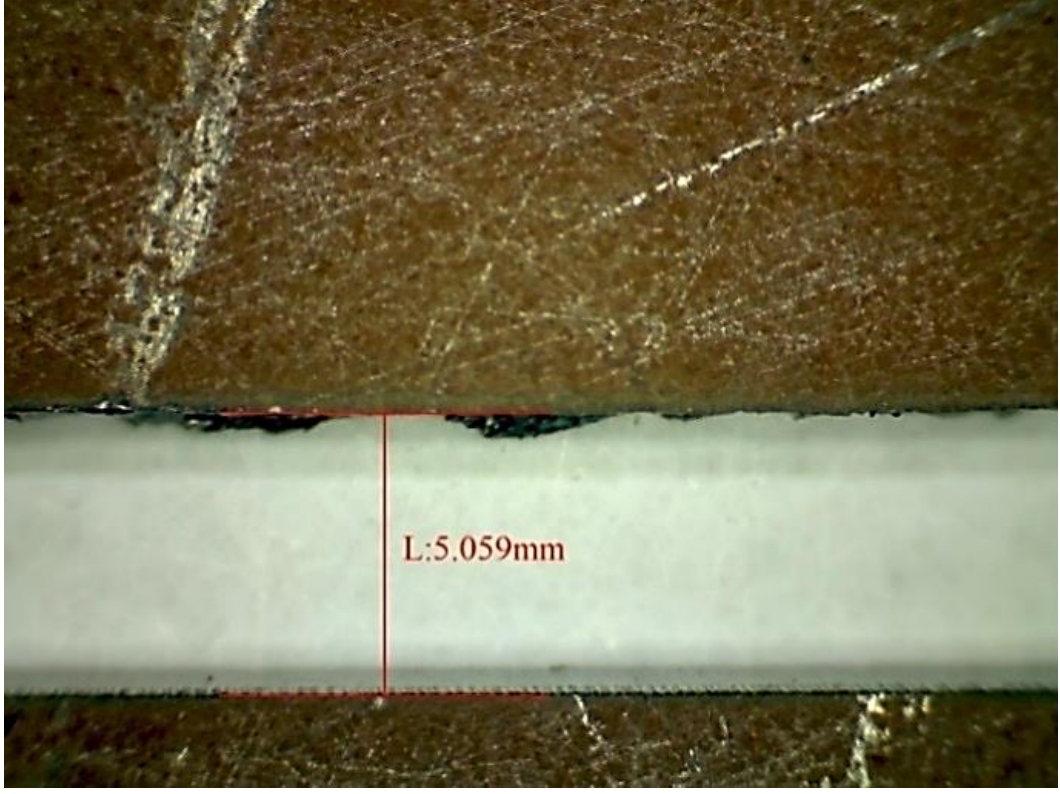
7.2. ÜST KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Lazer kesme işlemlerinde incelenmesi gereken önemli çıktı parametrelerden biri kerf genişliğidir. İş parçası malzemesi, kesme geometrisi ve kesme parametreleri gibi birçok farklı parametrelerden etkilenmektedir. Bu nedenle, lazer kesme işlemi sonrası üst kerf genişliği değerleri ölçülmüş kesme şekli ve kesme parametrelerinin üst kerf genişliği oluşumuna etkisi incelenmiştir.

Yapılan çalışmada 6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin üç farklı kesme hızı (850, 900 ve 950 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7, 0,8 ve 0,9 Bar) ve üç farklı odak noktası (-0,5, 0 ve 0,5 mm) kullanılarak düz, V ve yay biçiminde iş parçaları kesilmiştir. Şekil 7.5’de farklı kesme parametrelerde düz kesim yapılan iş parçasının kesme parametrelerine bağlı üst kerf genişliği değişimi görülmektedir. Şekil 7.5’de lazerle düz kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,06 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla üst kerf genişliği %4,15 oranında artarak 5,27 mm olmuştur. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,19 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %1,17 oranında artarak 5,25 mm olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,33 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %0,75 oranında artarak 5,37 mm ölçülmüştür. Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen üst kerf genişliğine ait mikroskop görüntüsü Şekil 7.6’da verilmiştir.

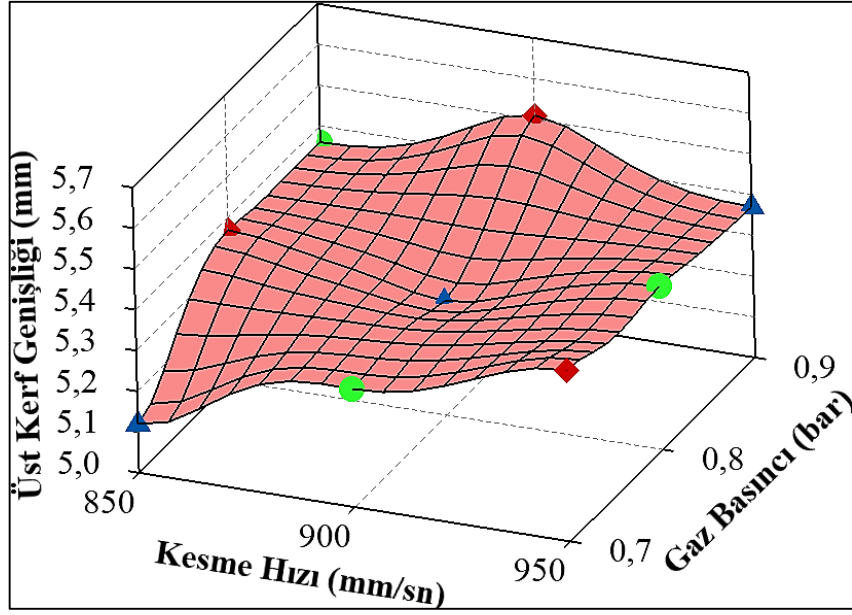


Şekil 7.5. Düz kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi. (▲: -0,5mm, ●: 0 mm, ◆: 0,5 mm)

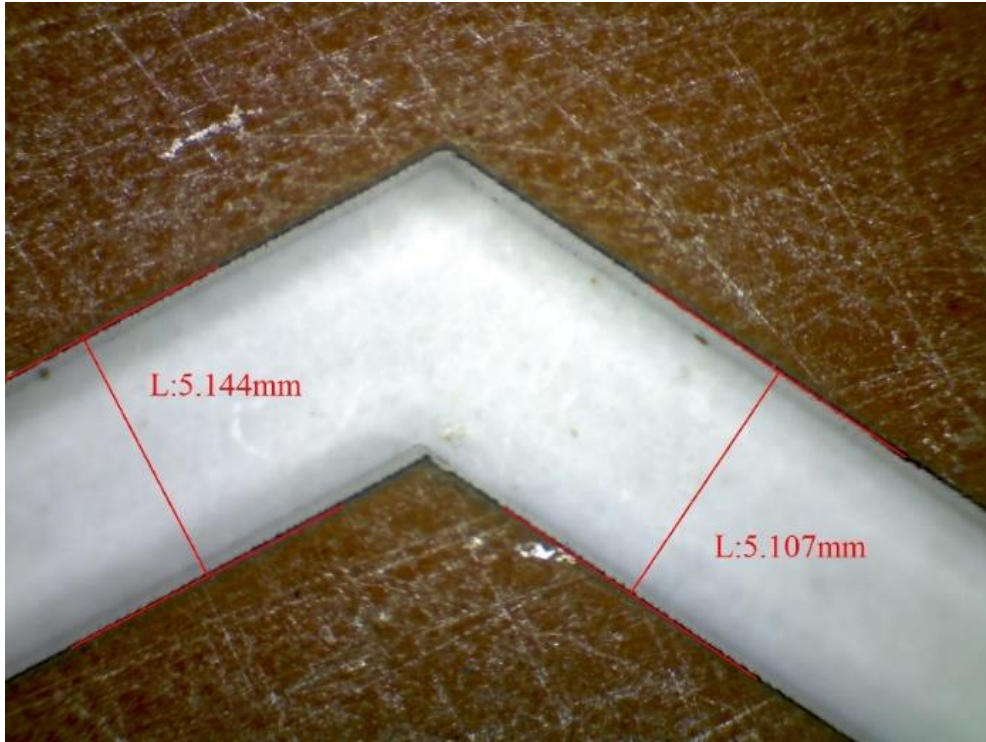


Şekil 7.6. Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.

Şekil 7.7’de lazerle V kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,12 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla üst kerf genişliği %4,88 oranında artarak 5,37 mm olmuştur. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,29 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %1,32 oranında artarak 5,36 mm olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,42 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %1,66 oranında artarak 5,51 mm ölçülmüştür. V kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen üst kerf genişliğine ait mikroskop görüntüsü Şekil 7.8’de verilmiştir.



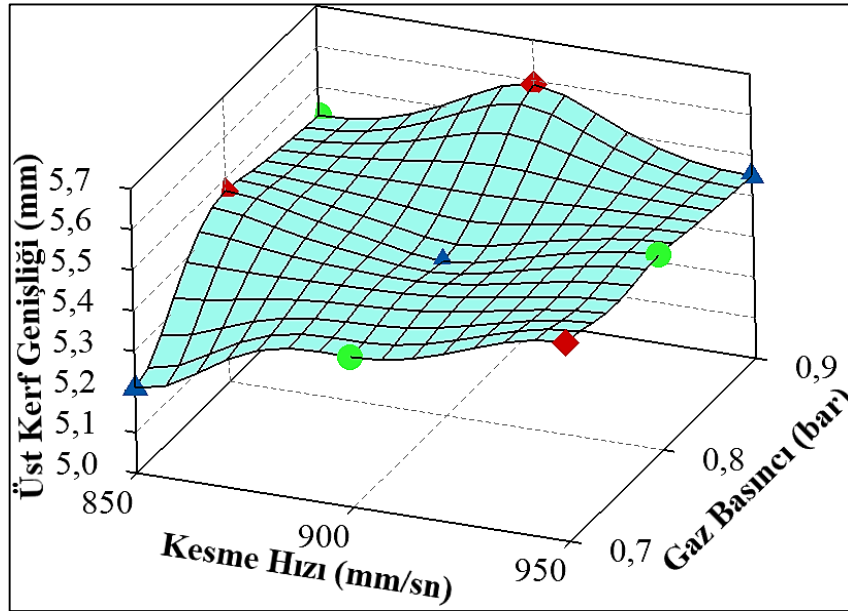
Şekil 7.7. V kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi. (▲: -0,5 mm, ●: 0 mm, ◆: 0,5 mm).



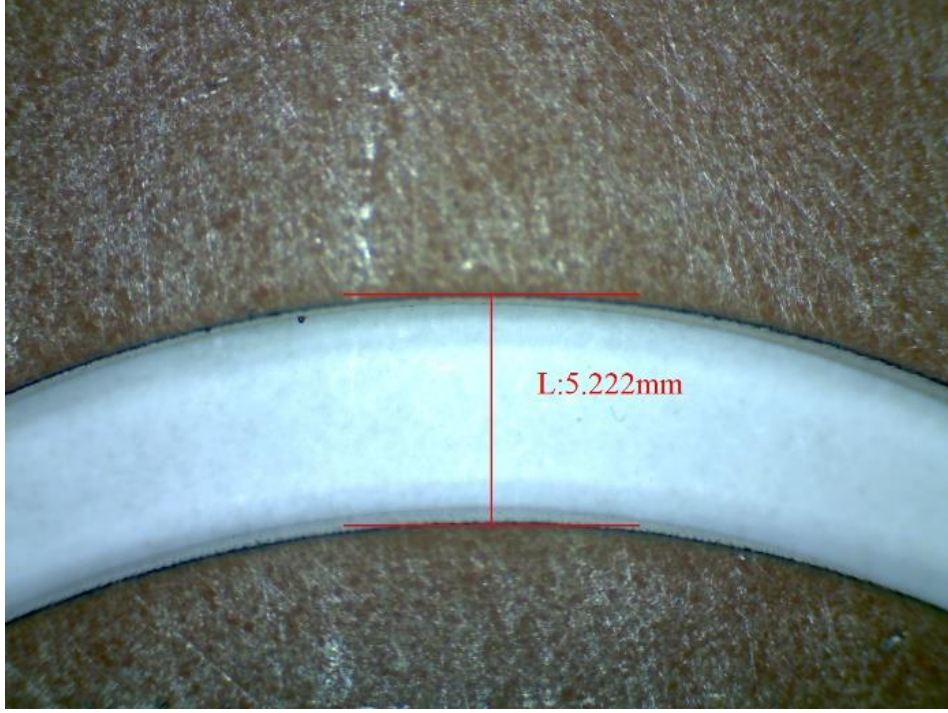
Şekil 7.8. V kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.

Şekil 7.9'da lazerle yay kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,21 mm

ölçülmüştür. Kesme hızının 950 mm/sn ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılmasıyla üst kerf genişliği %4,60 oranında artarak 5,45 mm olmuştur. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 0,7 bar gaz basıncında ve 900 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,37 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %1,11 oranında artarak 5,43 mm olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında üst kerf genişliği 5,49 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle üst kerf genişliği %1,82 oranında artarak 5,59 mm ölçülmüştür. Yay kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen üst kerf genişliğine ait mikroskop görüntüsü Şekil 7.10'da verilmiştir.



Şekil 7.9. Yay kesimde kesme parametrelerinin üst kerf genişliğine etkisi. (▲: -0,5 mm, ●: 0 mm, ◆: 0,5 mm).



Şekil 7.10. Yay kesim için optimum kesme parametrelerinde üst kerf genişliği.

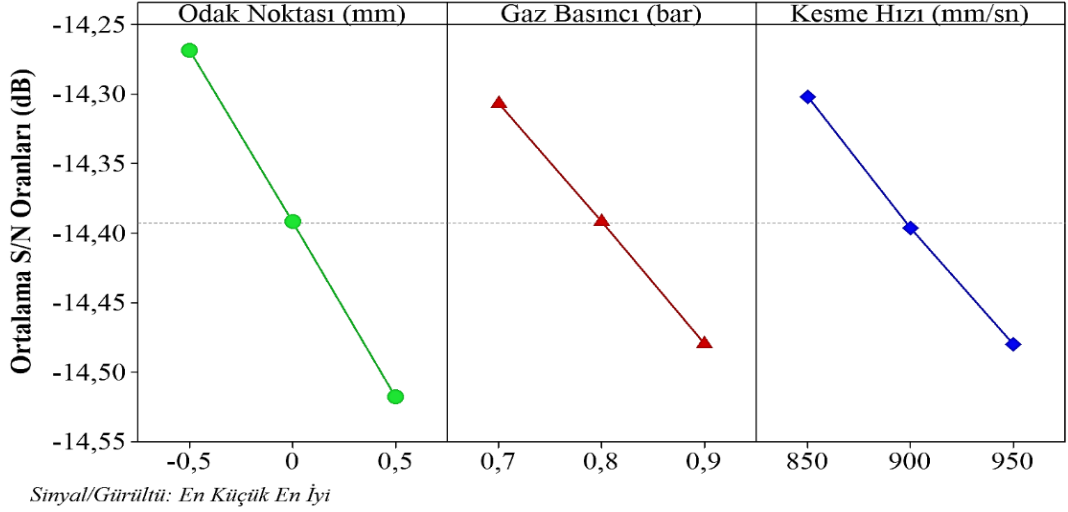
Yapılan çalışmada kesme hızının artırılmasıyla üst kerf genişliğinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni yüksek kesme hızlarında kesme bölgesinde daha az ısının oluşması kesme bölgesinde ergitilen malzeme oranının az olması düşük kerf genişliğinin oluşmasına neden olduğu düşünülmektedir. Gaz basıncının artırılmasıyla üst kerf genişliğinin arttığı tespit edilmiştir. Gaz basıncının artırılması ile kesme bölgesinde ergitilmiş iş parçasının kesme bölgesinde daha fazla miktarda uzaklaştırılması üst kerf genişliğinin artmasının bir nedeni olarak açıklanabilir. Odak noktasının iş parçasına yaklaştıkça üst kerf genişliğinin azaldığı belirlenmiştir. Odak noktasının iş parçasına yaklaşması ile lazer ışını daha düzenli hale gelmektedir bu da daha düzgün bir kesme işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır.

Çizelge 7.3'te Taguchi metodu kullanılarak elde edilen optimum odak noktası, gaz basıncı ve kesme hızı değerleri için lazer kesme parametrelerinin optimum seviyelerini göstermektedir. Düz, V ve yay kesimde ölçülen üst kerf genişliği için ideal kesme parametreleri seviyeleri odak noktası -0,5 mm (seviye 1), gaz basıncı 0,7 bar (seviye 1) ve kesme hızı 850 mm/sn (seviye 1) olmuştur.

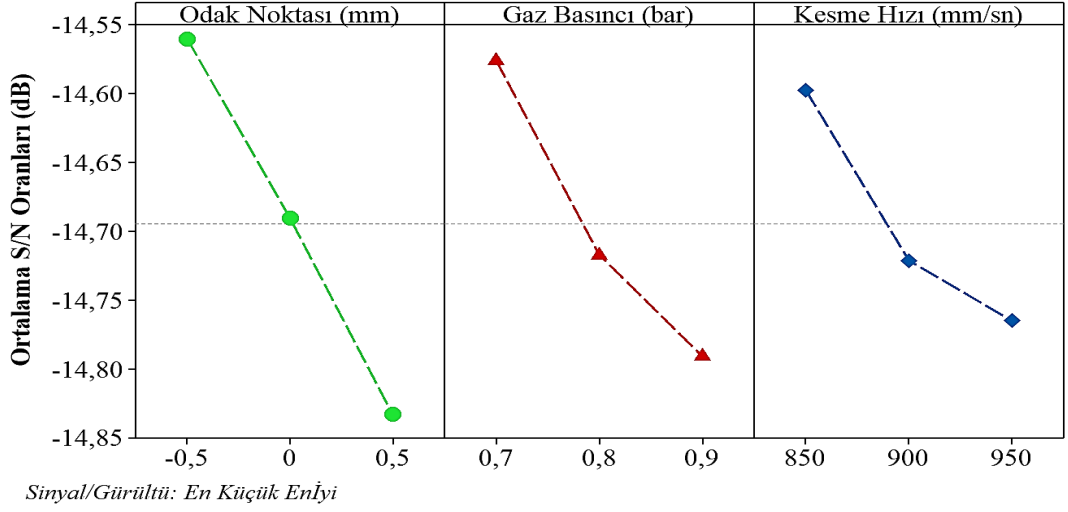
Çizelge 7.3. Üst kerf genişliği için S/N yanıt tabloları.

Düz Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,27	-14,31	-14,30
2	-14,39	-14,39	-14,40
3	-14,52	-14,48	-14,48
Hata	0,25	0,17	0,18
Toplam	1	3	2
V Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,41	-14,44	-14,46
2	-14,57	-14,57	-14,58
3	-14,70	-14,67	-14,64
Hata	0,29	0,22	0,19
Toplam	1	2	3
Yay kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,56	-14,58	-14,60
2	-14,69	-14,72	-14,72
3	-14,83	-14,79	-14,76
Hata	0,27	0,21	0,17
Toplam	1	2	3

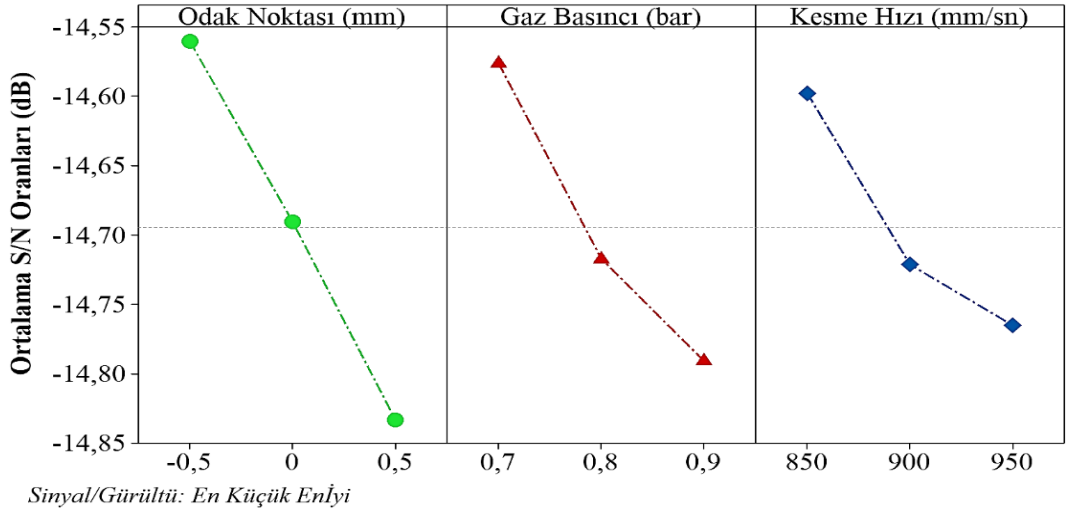
6 mm kalınlığındaki Hardox 500 farklı geometrilerde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre üst kerf genişliği için S/N oranları Şekil 7.11’de verilmiştir. S/N analizi yapılırken “en küçük en iyi”, “en büyük en iyi”, “nominal en iyi” olmak üzere üç farklı analiz yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada lazer kesme işleminde düşük üst kerf genişliği istendiği için S/N analizi için “en küçük en iyi” yöntemi kullanılmıştır. S/N oranında "Sinyal" istenen değeri temsil ederken "Gürültü" istenmeyen değeri temsil etmektedir. Böylelikle yapılan deneylerde optimum kesme parametreleri S/N oranının en büyük olduğu yerde elde edilmektedir. Şekil 7.11 (a), (b), (c)’de düz, V ve yay kesimde S/N değerlerinin en yüksek çıktığı lazer kesme parametreleri odak noktası -0,5 mm, gaz basıncının 0,7 bar ve kesme hızının 850 mm/sn olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.11. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre üst kerf genişliği için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.

6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin farklı geometrilerde lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin etkilerinin belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Çizelge 7.4’de varyans analizi sonuçları verilmiştir. Çizelge 7.4’de düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %50,21 %23,83 ve %25,42 olmuştur. Çizelge 7.4’de V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %49,23 %29,48 ve %21,08 olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.4’de yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %49,21 %31,14 ve %19,58 olmuştur.

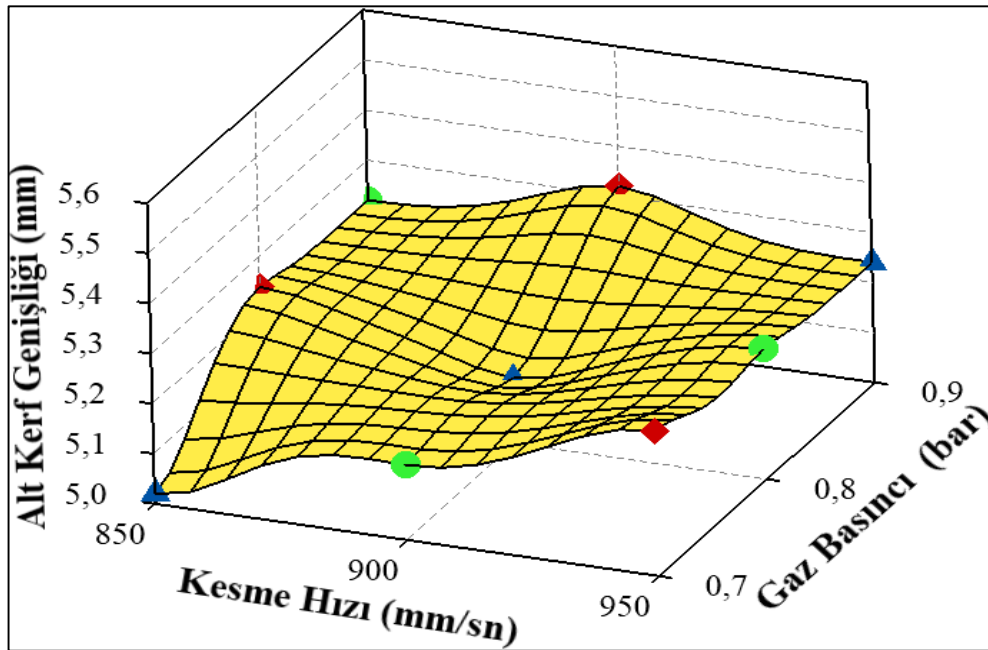
Çizelge 7.4. Üst kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.

Düz Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,033756	50,21	0,016878	94,94	0,010
Gaz basıncı (bar)	2	0,016022	23,83	0,008011	45,06	0,022
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,017089	25,42	0,008544	48,06	0,020
Hata	2	0,000356	0,53	0,000178		
Toplam	8	0,067222	100,00			
V Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,046867	49,23	0,023433	234,33	0,004
Gaz basıncı (bar)	2	0,028067	29,48	0,014033	140,33	0,007
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,020067	21,08	0,010033	100,33	0,010
Hata	2	0,000200	0,21	0,000100		
Toplam	8	0,095200	100,00			
Yay Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,043400	49,21	0,021700	651,00	0,002
Gaz basıncı (bar)	2	0,027467	31,14	0,013733	412,00	0,002
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,017267	19,58	0,008633	259,00	0,004
Hata	2	0,000067	0,08	0,000033		
Toplam	8	0,088200	100,00			

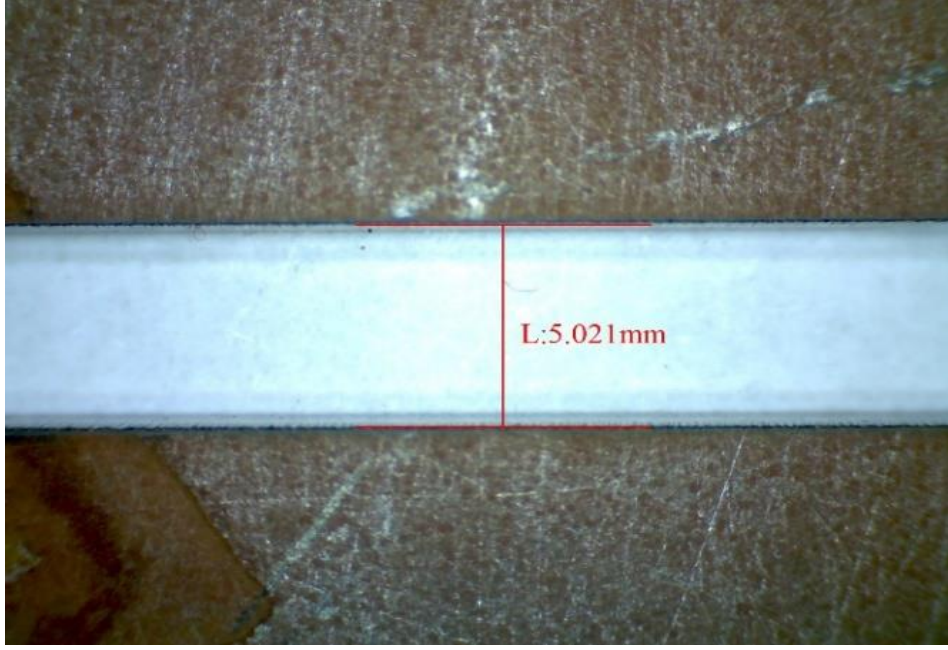
7.3. ALT KERF GENİŞLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin üç farklı kesme hızı (850, 900 ve 950 mm/sn), üç farklı gaz basıncı (0,7, 0,8 ve 0,9 Bar) ve üç farklı odak noktası (-0,5, 0 ve 0,5 mm) kullanılarak düz, V ve yay biçiminde iş parçaları kesilmiştir.

Şekil 7.12’de farklı kesme parametreleri düz kesim yapılan iş parçasının kesme parametrelerine bağlı alt kerf genişliği değişimi görülmektedir. -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında lazerle düz kesim yapılan iş parçasında alt kerf genişliği 5,02 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 950 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği %4,38 (5,24 mm) oranında artmıştır. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 900 mm/sn kesme hızında ve 0,7 bar gaz basıncında alt kerf genişliği 5,15 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesi ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması alt kerf genişliği %1,36 (5,22 mm) oranında artma olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında alt kerf genişliği 5,29 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle alt kerf genişliği %0,57 (5,32 mm) oranında artmıştır. Şekil 7.13’te Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen alt kerf genişliği ait mikroskop görüntüsü verilmiştir.

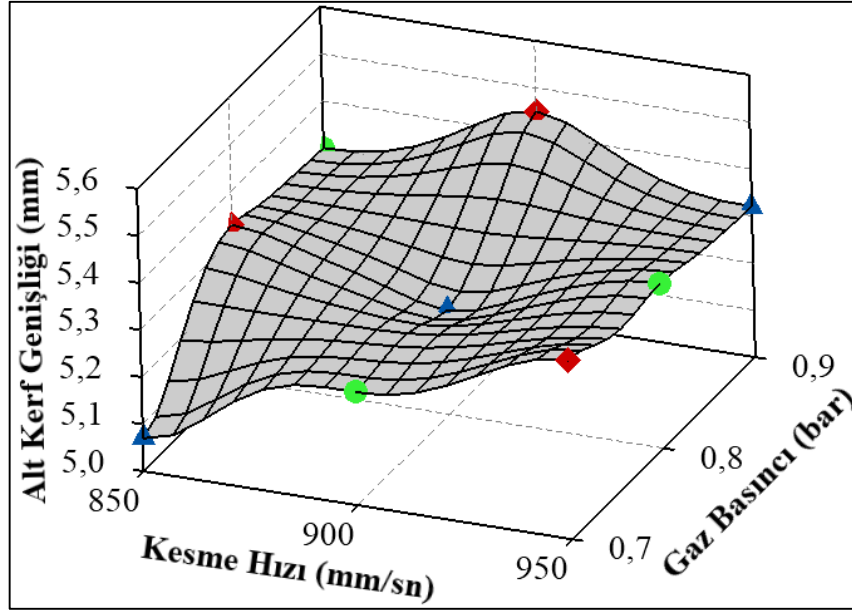


Şekil 7.12. Düz kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi. (▲: -0,5 mm, ● : 0 mm, ◆ : 0,5 mm).

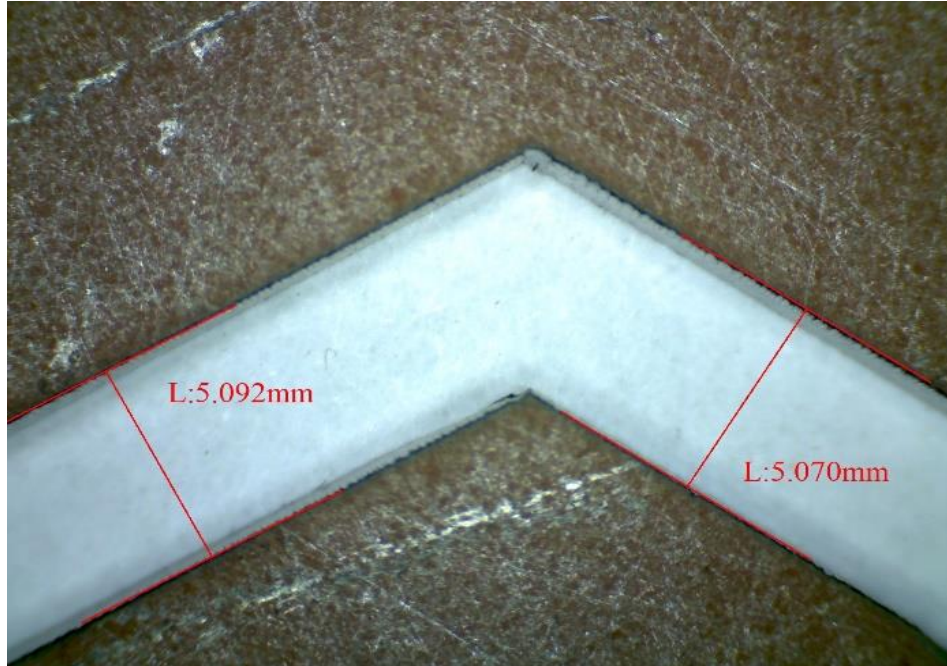


Şekil 7.13. Düz kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.

Şekil 7.14’de farklı kesme parametrelerde V kesim yapılan iş parçasının kesme parametrelerine bağlı alt kerf genişliği değişimi görülmektedir. -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında lazerle düz kesim yapılan iş parçasında alt kerf genişliği 5,07 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 950 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği %4,93 (5,32 mm) oranında artmıştır. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 900 mm/sn kesme hızında ve 0,7 bar gaz basıncında alt kerf genişliği 5,24 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesi ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması alt kerf genişliği %1,14 (5,3 mm) oranında artma olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında alt kerf genişliği 5,38 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle alt kerf genişliği %1,3 (5,45 mm) oranında artmıştır. Şekil 7.15’de V kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen alt kerf genişliği ait mikroskop görüntüsü verilmiştir.



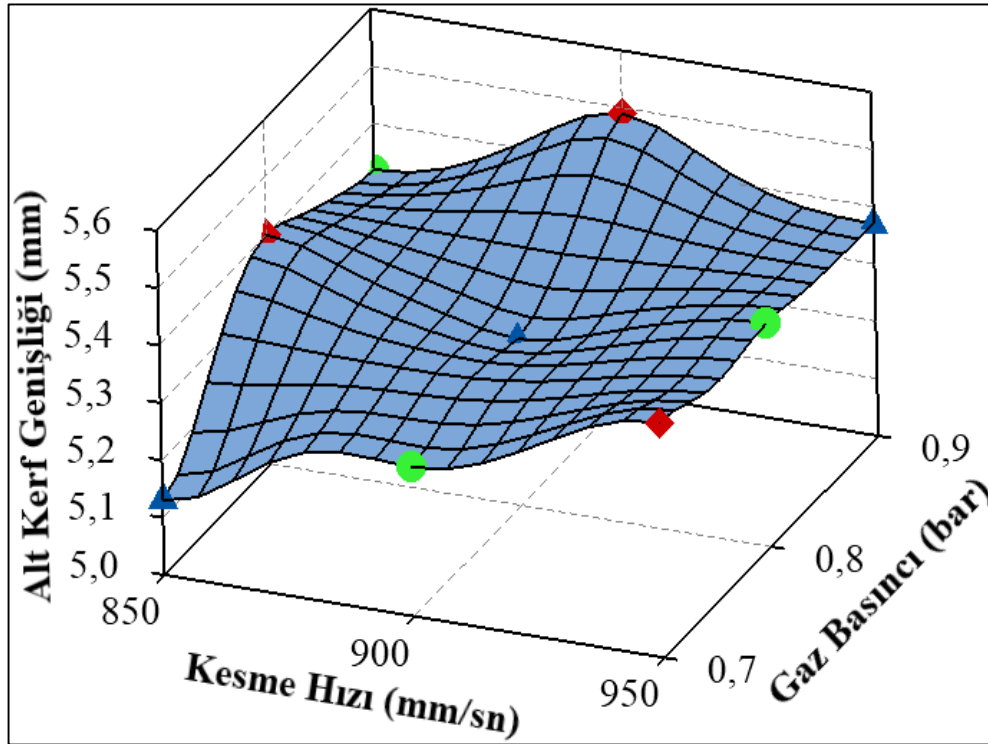
Şekil 7.14. V kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi. (▲: -0,5 mm, ●: 0 mm, ◆: 0,5 mm).



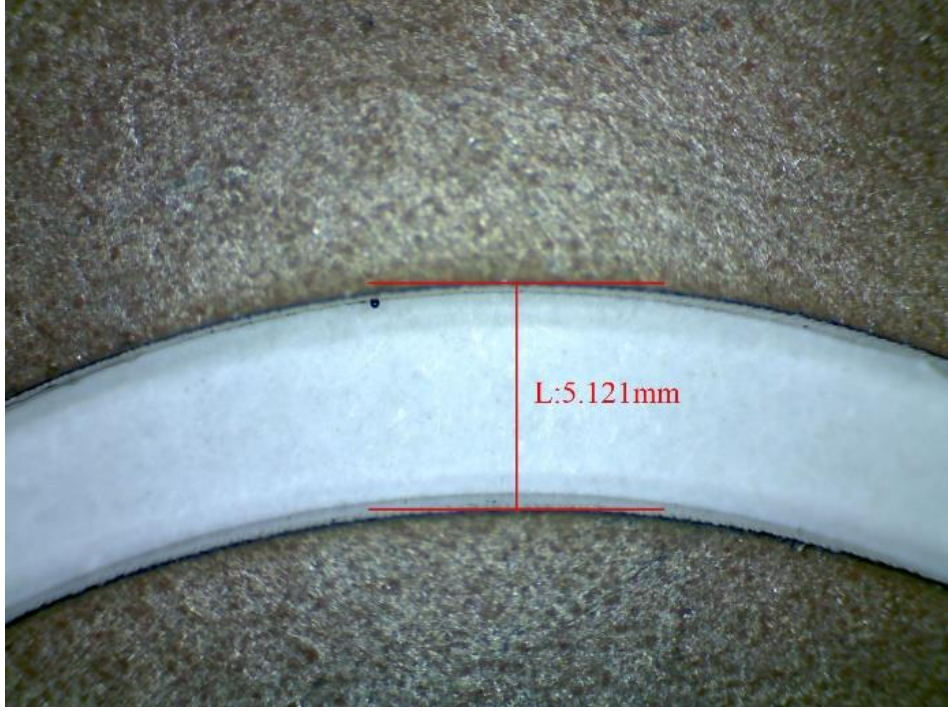
Şekil 7.15. V kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.

Şekil 7.16'da farklı kesme parametrelerde yay kesim yapılan iş parçasının kesme parametrelerine bağlı alt kerf genişliği değişimi görülmektedir. -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında lazerle düz kesim yapılan iş parçasında alt kerf genişliği 5,13 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,9 bar

ve kesme hızının 950 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği %4,67 (5,37 mm) oranında artmıştır. 0 mm odak noktasında yapılan deneyler incelendiğinde 900 mm/sn kesme hızında ve 0,7 bar gaz basıncında alt kerf genişliği 5,26 mm ölçülmüştür. Kesme hızının 850 mm/sn düşürülmesi ve gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması alt kerf genişliği %1,14 (5,32 mm) oranında artma olmuştur. 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında alt kerf genişliği 5,41 mm olurken, gaz basıncının 0,9 bar çıkarılması ve kesme hızının 900 mm/sn düşürülmesiyle alt kerf genişliği %1,47 (5,49 mm) oranında artmıştır. Şekil 7.16'de yay kesim için optimum kesme parametrelerinde elde edilen alt kerf genişliği ait mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.16. Yay kesimde kesme parametrelerinin alt kerf genişliğine etkisi (▲ : -0,5 mm, ● : 0 mm, ◆ : 0,5 mm).



Şekil 7.17. Yay kesim için optimum kesme parametrelerinde alt kerf genişliği.

Yapılan bütün deneylerde alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha dar çıktığı tespit edilmiştir. Bunun ana nedeni iş parçasının üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru inildikçe kesme bölgesinde ısıdan etkilenen malzeme oranı farklılık göstermektedir. Üst kerf bölgesinde uzaklaştırılan malzeme oranının alt kerf bölgesinden uzaklaştırılan malzeme oranından fazla olacağı düşünülmektedir. Buda alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğine göre daha dar olmasına neden olmaktadır.

Odak noktası, gaz basıncı ve kesme hızı değerleri için Taguchi metodu kullanılarak elde edilen lazer kesme parametrelerinin optimum seviyeleri Çizelge 7.5'te göstermektedir. Düz, V ve yay kesimde ölçülen alt kerf genişliği için ideal kesme parametreleri seviyeleri odak noktası -0,5 mm (seviye 1), gaz basıncı 0,7 bar (seviye 1) ve kesme hızı 850 mm/sn (seviye 1) olmuştur.

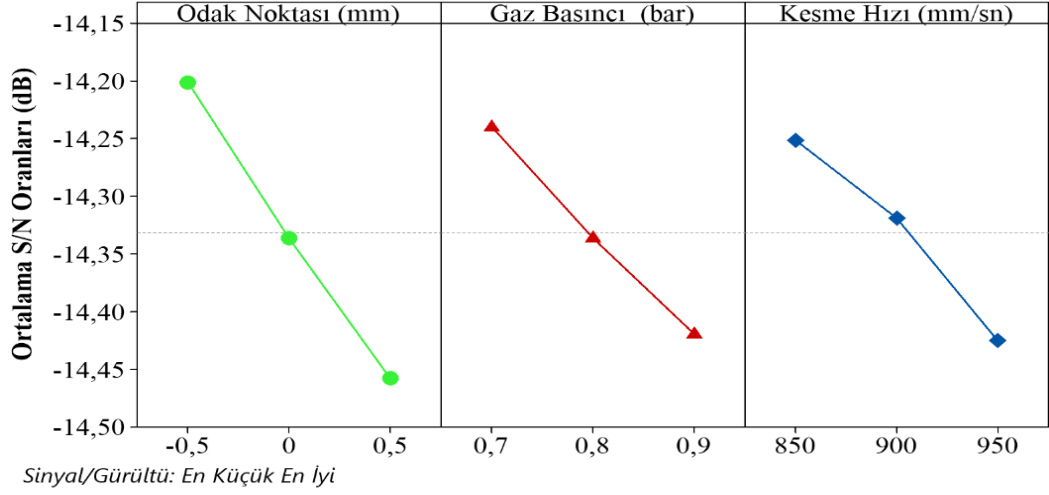
Şekil 7.18'de farklı geometrilere lazerle kesilen 6 mm kalınlığındaki Hardox 500 çeliğinin kesme parametrelerine göre alt kerf genişliği için sinyal/gürültü oranları verilmiştir. Yapılan analizlerde sinyal/gürültü oranının en büyük olan değerler optimum kesme parametrelerini temsil etmektedir. Şekil 7.18 (a), (b), (c)'de düz, V ve

yay kesimde sinyal/gürültü değerlerinin en yüksek çıktığı lazer kesme parametreleri odak noktası -0,5 mm, gaz basıncının 0,7 bar ve kesme hızının 850 mm/sn olmuştur.

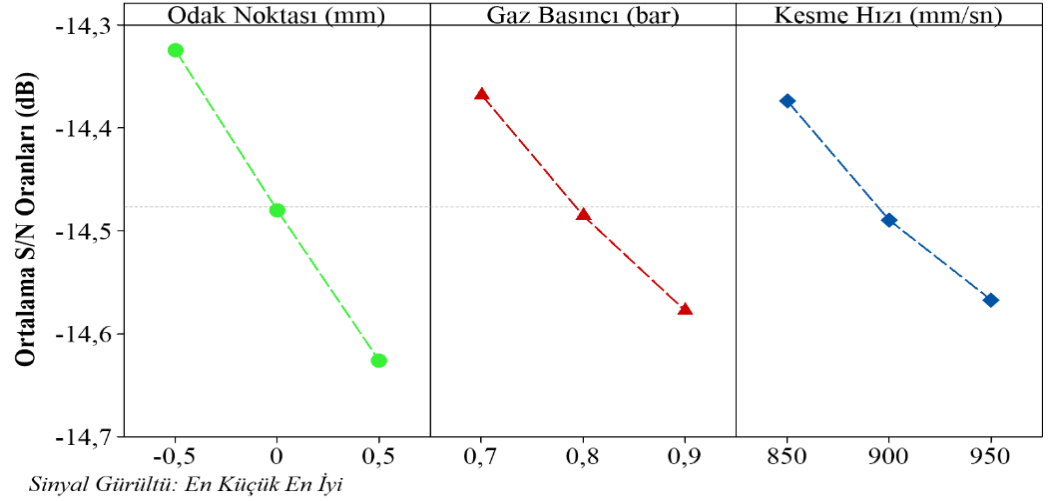
Çizelge 7.5. Alt kerf genişliği için S/N yanıt tabloları.

Düz Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,20	-14,24	-14,25
2	-14,34	-14,34	-14,32
3	-14,46	-14,42	-14,43
Hata	0,26	0,18	0,17
Toplam	1	2	3
V Kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,32	-14,37	-14,37
2	-14,48	-14,49	-14,49
3	-14,63	-14,58	-14,57
Hata	0,30	0,21	0,19
Toplam	1	2	3
Yay kesim			
Seviye	Odak Noktası (mm)	Gaz basıncı (Bar)	Kesme hızı (mm/sn)
1	-14,42	-14,43	-14,46
2	-14,52	-14,58	-14,56
3	-14,70	-14,64	-14,63
Hata	0,28	0,21	0,18
Toplam	1	2	3

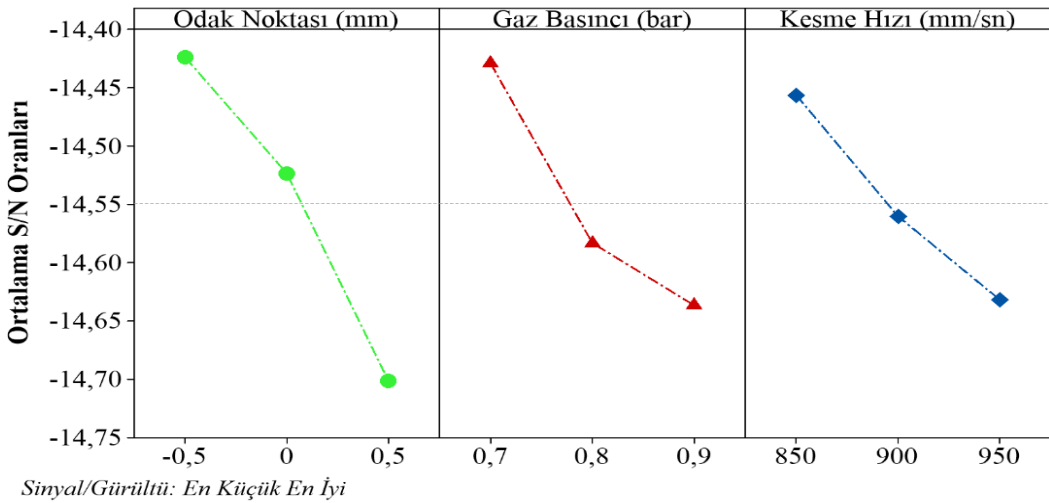
Hardox 500 çeliğinin farklı geometrilere lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin etkilerinin belirlemek için varyans analizi yapılmıştır. Çizelge 7.6'da varyans analizi sonuçları verilmiştir. Çizelge 7.6'da düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %51,18 %24,78 ve %23,62 olmuştur. V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %52,84 %25,31 ve %21,68 olarak belirlenmiştir. Yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %50,80 %29,46 ve %19,67 olmuştur.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.18. Lazerle kesilmesinde kesme parametrelerine göre alt kerf genişliği için sinyal/gürültü oranları a) Düz kesim, b) V kesim, c) Yay kesim.

Çizelge 7.6. Alt kerf genişliği için kontrol faktörlerinin seviye değerleri.

Düz Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,035289	51,18	0,017644	122,15	0,008
Gaz basıncı (bar)	2	0,017089	24,78	0,008544	59,15	0,017
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,016289	23,62	0,008144	56,38	0,017
Hata	2	0,000289	0,42	0,000144		
Toplam	8	0,068956	100,00			
V Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,050422	52,84	0,025211	324,14	0,003
Gaz basıncı (bar)	2	0,024156	25,31	0,012078	155,29	0,006
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,020689	21,68	0,010344	133,00	0,007
Hata	2	0,000156	0,16	0,000078		
Toplam	8	0,095422	100,00			
Yay Kesim						
Faktör	Serbestlik Derecesi (SD)	Kareler Toplamı (KT)	Katkı Oraları (%)	Kareler Ortalaması (KO)	F Değeri	P Değeri
Odak noktası (mm)	2	0,044600	50,80	0,022300	669,00	0,001
Gaz basıncı (bar)	2	0,025867	29,46	0,012933	388,00	0,003
Kesme hızı (mm/sn)	2	0,017267	19,67	0,008633	259,00	0,004
Hata	2	0,000067	0,08	0,000033		
Toplam	8	0,087800	100,00			

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Lazer ile kesmede optimum kesme parametrelerinin elde edilmesi kesim kalitesini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada Hardox 500 çeliğinin lazer kesme işlemi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt kerf genişliği üzerine etkileri incelenmiştir. Lazer ile kesme işlemleri yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için optimum parametreler belirlenmiş ve çıktı parametreleri üzerine en etkin kesme parametrelerinin belirlenmesi için varyans analizi yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Lazerle düz kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 950 mm/sn kesme hızında ve 0,9 bar gaz basıncında 2,096 μm en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 3,312 μm olarak ölçülmüştür.
- Lazerle V kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 950 mm/sn kesme hızında ve 0,9 bar gaz basıncında 2,756 μm en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 4,378 μm olarak ölçülmüştür
- Lazerle yay kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 950 mm/sn kesme hızında ve 0,9 bar gaz basıncında 3,009 μm en düşük yüzey pürüzlülüğü ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,5 mm odak noktasında 0,7 bar gaz basıncında ve 950 mm/sn kesme hızında 4,795 μm olarak ölçülmüştür.

- Lazer kesme sonrası yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimum seviyelerinin belirlenmesinde S/N oranı kullanılmıştır. Düz kesim için -0,5 odak noktası, 0,9 bar gaz basıncı ve 950 mm/sn kesme hızı değerlerinin optimum lazer kesme parametresi seviyeleri olarak belirlenmiştir.
- V ve Yay kesim için -0,5 odak noktası, 0,9 bar gaz basıncı ve 850 mm/sn kesme hızı değerlerinin optimum lazer kesme parametresi seviyeleri olarak tespit edilmiştir.
- Varyans (ANOVA) analizi sonucu, düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %53,33, %45,15 ve %0,47 olmuştur. V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %40,25, %58,56 ve %0,95 olarak belirlenmiştir. Yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %31,41, %66,01 ve %1,35 olmuştur.
- Lazerle düz kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,06 mm ölçülmüştür. En yüksek kerf genişliği 0,5 mm odak noktasında gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla üst kerf genişliği 5,37 mm ölçülmüştür.
- Lazerle V kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,12 mm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla üst kerf genişliği artarak 5,51 mm ölçülmüştür.
- Lazerle yay kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük üst kerf genişliği 5,21 mm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla üst kerf genişliği artarak 5,59 mm ölçülmüştür.

- Düz, V ve Yay kesimlerde en düşük üst kerf genişliği için -0,5 odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı ve 850 mm/sn kesme hızı değerlerinin optimum lazer kesme parametresi seviyeleri olarak tespit edilmiştir.
- Varyans (ANOVA) analizi sonucu, düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %50,21, %23,83 ve %25,42 olmuştur. V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %49,23, %29,48 ve %21,08 olarak belirlenmiştir. Yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %49,21, %31,14 ve %19,58 olmuştur.
- Lazerle düz kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük alt kerf genişliği 5,02 mm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği artarak 5,32 mm ölçülmüştür.
- Lazerle V kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük alt kerf genişliği 5,07 mm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği artarak 5,45 mm ölçülmüştür.
- Lazerle yay kesim yapılan iş parçasında -0,5 mm odak noktasında, 850 mm/sn kesme hızının ve 0,7 bar gaz basıncında en düşük alt kerf genişliği 5,13 mm ölçülmüştür. 0,5 mm odak noktasında, gaz basıncının 0,9 bar ve kesme hızının 900 mm/sn çıkarılmasıyla alt kerf genişliği artarak 5,49 mm ölçülmüştür.
- Yapılan bütün deneylerde alt kerf genişliğinin üst kerf genişliğinden daha dar çıktığı tespit edilmiştir. Bunun ana nedeni iş parçasının üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru inildikçe kesme bölgesinde ısıdan etkilenen malzeme oranı farklılık göstermektedir.

- Düz, V ve Yay kesimde ölçülen alt kerf genişliği için ideal kesme parametreleri seviyeleri odak noktası -0,5 mm, gaz basıncı 0,7 bar ve kesme hızı 850 mm/sn olmuştur.
- Varyans (ANOVA) analizi sonucu, düz kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %51,18, %24,78 ve %23,62 olmuştur. V kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %52,84, %25,31 ve %21,68 olarak belirlenmiştir. Yay kesim için odak noktasının, gaz basıncının ve kesme hızının etki oranları sırası ile %50,80, %29,46 ve %19,67 olmuştur.

8.2. ÖNERİLER

- Yapılan çalışma ile elde edilen yüzeyler SEM mikroskobu ile incelenerek numunelerin mikroyapı değişimleri gözlemlenebilir.
- Bu çalışmada 6 mm kalınlığa sahip Hardox 500 çeliği ile kesme işlemi yapılmıştır farklı kalınlıkta malzemeler kullanılması ile deneyler yapılabilir.
- Numunelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmasından dolayı meydana gelen ITAB bölgeleri ve sertlik değişimleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- 1) Tunç, M., “CO2 Lazer Kesim Tezgahlarında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü** (2015).
- 2) Kovalenko, V., & Zhuk, R., “Systemized approach in laser industrial systems design” *Journal of materials processing technology*, 149(1), 553- 556 (2004).
- 3) Öner, U., “Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Aralığı ve Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara (2008).
- 4) Çavdar, K., & Tanrısever, T., “Farklı malzemelerin lazerle kesilmesi”, **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering**, 18(2), 79-99 (2018).
- 5) 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** (2014).
- 6) M. Toprak, “Katı borlamanın HARDOX 450 ve HARDOX hituf çeliklerin yüzey özelliklerine etkisi” Yüksek lisans tezi, **Harran Üniversitesi** (2019).
- 7) 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), ISITES2017 Baku-Azerbaijan (2017).
- 8) Uslan, I., “CO2 laser cutting: kerf width variation during cutting”, Proceedings of the institution of mechanical engineers, **Part B: Journal of engineering manufacture**, 219(8), 571-577 (2005).
- 9) Tanrıverdi, M.A., “Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi”, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**, Bursa, 36-69 (2001)
- 10) 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).
- 11) 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).

- 12) Dubey AK, Yadava V, “*Multi-objective optimisation of laser beam cutting process*”, *Opt Laser Technol*, 40(3):562-570 (2008).
- 13) Choudhury, I. A., & Shirley, S., “Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation”, *Optics & Laser Technology*, 42(3), 503-508 (2010).
- 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) 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).
- 16) Rajaram, J. S., Cheraghi, H. S., “CO₂ laser cut quality of 4130 steel”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 351-358 (2003).
- 17) Zaiied, 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).
- 18) 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, 52-70 (2011).
- 19) 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).
- 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*, 196:64-72 (2008).
- 21) Gördebil, A., “Lazer ile kaynaklanmış P265 Nb çeliklerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı*, Konya, 63-101 (2011).
- 22) Kurt, M., Kaynak, Y., Bağci, 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).
- 23) Ürgüplü, M., & Köksal, S., “Lazer ile Kesme İşlemlerinde Kesim Kalitesine Etki Eden Parametreler”, *Sakarya Üniversitesi*, Syf, 868 (2015).
- 24) İnternet: “Lazer nedir?”, <http://www.diyadinnet.com/YararliBilgiler-1262> (2020).

- 25) Cebeci, İ., Özlü, B., & Demir, H. “AISI 310 Kalite Östenitik Paslanmaz Sac Malzemenin Lazerle Kesilmesinde Kesme Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin İncelenmesi”, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(4), 2791-2799 (2021).
- 26) Işık, R., Özlü, B., & Demir, H., “St-37 Malzemesinin Lazer ile Kesme İşleminde Seçilen Parametrelerin Etkisinin Deneysel ve İstatiksel Olarak İncelenmesi”, *Firat University Journal of Engineering*, 33(1) (2021).
- 27) 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).
- 28) Oral, C., Kumruoğlu, C. L., “Lazer ile kesimin, malzemelere termal etkisi” Orijinal Alıntı, *Alternative Methods for Precision Sheet Metal Fabricating Conference*, June 1996, San Jose, CA by Leonard Migliore (1997).
- 29) Öncel, L., “316L çelik esaslı implantların çeşitli kesilme yöntemleri ile kesilmesinin ve kesim sonrası tavlama işlemlerinin mikroyapısal karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 69-109 (2009).
- 30) Tanrıverdi, M.A., “Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı*, Bursa, 36-69 (2001).
- 31) İnternet: “Lazer Uygulamaları”, <https://www.turkchem.net/lazerlerin-endustriyel-uygulamalarindaki-son-gelismeleri.html> (2021).
- 32) Yılmaz, E., “Çelik malzemelerin laser kesim parametrelerinin optimizasyonu”, (2009).
- 33) Çelenk, O., “Kompozit-alüminyum hibrit yapının lazer kesim tezgâhı Y-eksenine uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi* (2018).
- 34) Mungan C., “Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları” Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 32- 37 (2006).
- 35) Topaloğlu, C., “Metal kesme teknolojilerinde kesme yüzeylerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2010).
- 36) Ürgüplü, M., “Su jeti destekli lazer sisteminin işlem kalitesine etkisinin incelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi* (2016).
- 37) Karaören, K., “Lazer İle Kesim Parametrelerinin Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (1999).

- 38) İnternet: <https://www.bystronic.com.tr/tr/Products/laser-cutting-systems/ByStar-Fiber.php> (2021).
- 39) Matoug, K. S. A., “Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (hsla) çeliklerin lazerle kesilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi* (2019).
- 40) Gençdoğan, D., “AISI 430/HARDOX 450 çeliğinin nikel ara tabaka kullanılarak TIG çift taraflı ark kaynak yöntemiyle birleştirilmesi”, Yüksek Lisans, *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* (2020).
- 41) Topal, A., “Plazma Transfer Ark Kaynak Yöntemi Kullanılarak AISI 1020 Çelik Yüzeylerinin Hardox 450 + FeW İle Kaplanması ve Aşınma Dirençlerinin Tespit Edilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman, 121s (2017).
- 42) İnternet: “Kırma değirmeni”, <https://www.akytechnology.com/tr/detay/279/kabuk-soyma-degirmenleri/yem-kirma-makinasi-cekicli-degirmen>, (2021).
- 43) Akgün, M., Demir, H., “Estimation of Surface Roughness and Flank Wear in Milling of Inconel 625 Superalloy”, *Surface Review and Letters*, DOI: 10.1142/S0218625X21500116.
- 44) Akgün, M., Demir, H., “Optimization of Cutting Parameters Affecting Surface Roughness in Turning of Inconel 625 Superalloy by Cryogenically Treated Tungsten Carbide Inserts”, *SN Applied Sciences*, 3:277 (2021).

ÖZGEÇMİŞ

Nihal EKSİLMEZ, ilk ve orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2015 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.