

*Araştırma Makalesi – Research Article*

# Hardox 450 Çeliğinin Lazerle Delinmesinde Kesme Parametrelerinin Delik Kalitesi Üzerine Etkisinin İncelenmesi ve Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu\*

## Optimization of Cutting Parameters and Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Hole Quality in Laser Drilling of Hardox 450 Steel

Fulya Çırakoğlu<sup>1</sup>, Barış Özlü<sup>2\*</sup>, Halil Demir<sup>3</sup>

*Geliş / Received: 01/08/2021*

*Revize / Revised: 10/09/2021*

*Kabul / Accepted: 21/09/2021*

### ÖZ

Bu çalışmada, Hardox 450 çeliğinin lazerle delme işleminde kesme parametrelerinin (odak noktası, kesme hızı, gaz basıncı ve lazer gücü) yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı üzerine etkisi incelenmiştir. Lazer kesme işlemi için deney tasarımı, Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizinine göre yapılmıştır. Deneylerde kesme parametreleri olarak; iki farklı odak noktası, üç farklı gaz basıncı, üç farklı kesme hızı ve üç farklı lazer gücü seçilmiştir. Taguchi yöntemine göre lazer delme işleminde kullanılan kesme parametreleri optimize edildi. Ayrıca kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı üzerine etkilerinin belirlenmesi için varyans (ANOVA) analizi yapılmıştır. Sonuç olarak; Hardox 450 çeliğinin delinmesinde kesme hızının ve lazer gücünün artması yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olurken gaz basıncının ve odak noktasının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücünün artması ile üst ve alt delik dairesellik toleransı artarken, odak noktasının azalması üst ve alt delik dairesellik toleransının azalmasına neden olmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü 0,718 µm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir. Üst ve alt delik için sırası ile en küçük boyutsal tamlık 20,069 mm ve 20,024 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olmuştur. Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü ile üst ve alt delik dairesellik toleransı için sırası ile en etkin parametre %77,17 %51,40 ve %71,80 ile gaz basıncı olmuştur.

**Anahtar Kelimeler-** *Hardox 450 Çeliği, Lazer Delme, Yüzey Pürüzlülüğü, Dairesellik Toleransı, Taguchi*

### ABSTRACT

In this study, the effects of cutting parameters (focal point, cutting speed, gas pressure, and laser power) on surface roughness with top and bottom-hole circularity tolerance were investigated in laser drilling of Hardox 450 steel.

\*Bu çalışma Prof. Dr. Halil Demir ve Öğr. Gör. Dr. Barış Özlü danışmanlığında Fulya Çırakoğlu tarafından, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında, tamamlanan yüksek lisans tezinin bir bölümünden üretilmiştir.

<sup>1</sup>İletişim: [fulyacirakoglu@gmail.com](mailto:fulyacirakoglu@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0001-5914-4023>)

İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversite, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>\*Sorumlu yazar iletişimi: [barisozlu@aksaray.edu.tr](mailto:barisozlu@aksaray.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-8594-1234>)

Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

<sup>3</sup>İletişim: [hdemir@karabuk.edu.tr](mailto:hdemir@karabuk.edu.tr) (<https://orcid.org/0000-0002-9802-083X>)

İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversite, Karabük, Türkiye

The experimental design for the laser cutting process was made according to the Taguchi  $L_{18}$  orthogonal array. As the cutting parameters in the experiments; two different focus points, three different gas pressures, three different cutting speeds, and three different laser powers were selected. The cutting parameters used in the laser drilling process were optimized according to the Taguchi method. In addition, variance (ANOVA) analysis was performed to determine the effects of cutting parameters on surface roughness with tolerance of top and bottom hole circularity. In conclusion; while the increase in cutting speed and laser power in the drilling of Hardox 450 steel caused a decrease in surface roughness, the increase in gas pressure and focus point caused an increase in surface roughness. With the increase of gas pressure, cutting speed, and laser power, the top and bottom hole circularity tolerance increased, while the decrease in the focus point caused the top and bottom hole circularity tolerance to decrease. The optimum cutting parameters for the lowest surface roughness  $0.718 \mu\text{m}$  were determined as -1 mm focus point, 0.7 bar gas pressure, 1500 mm/sec cutting speed, and 2600 W laser power. The optimum cutting parameters for the smallest dimensional accuracy of 20.069 mm and 20.024 mm for the top and bottom holes, respectively, were -1 mm focus point, 0.7 bar gas pressure, 1100 mm/sec cutting speed, and 2200 W laser power. As a result of variance analysis, the most effective parameters for surface roughness and top and bottom hole circularity tolerance were 77.17%, 51.40% and 71.80%, respectively, gas pressure.

**Keywords-** *Hardox 450 Steel, LaserDrilling, SurfaceRoughness, Circularity Tolerance, Taguchi*

## I.GİRİŞ

Kimyasal kompozisyonunda genellikle düşük miktarda bor içeren Hardox çelikleri düşük alaşımli çelikler olarak sınıflandırılır. Bu çeliklerin yüksek mukavemet, iyi şekilledirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik gibi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerinden dolayı denizcilik ve madencilik endüstrisinde, ağır inşaat ekipmanlarında, öğütücülerde ve konveyör uygulamalarında kullanılmaktadır. Ancak bu çeliklerin tribolojik performansı, oda sıcaklığında, aşındırıcı ortamlarda ve yüksek çalışma sıcaklıklar gibi bazı mühendislik uygulamalarda istenen performansı göstermede yetersiz kalabiliyor. Bu nedenle bu çeliklerin performansını artırmak için yüzeylerine farklı yöntemlerle kaplamalar uygulanmaktadır [1-4].

Lazer kesme işleminde, lazer ışınının termal enerjisi iş parçasını eritmek ve buharlaştırmak için kullanılır. Daha sonra ergitilen malzeme yüksek gaz basıncı ile kesme bölgesinden uzaklaştırılır [5]. Lazerle işleme dışçılık cihazları, kemik dokusu, sensörler, güneş pilleri, foto-dedektörler, uçak ve otomotiv endüstrisi dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılan malzemelerin kesme, delme ve kaynak yapmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [6]. İmalat endüstrisinde kullanılan geleneksel metal işleme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, lazer işleme yönteminde daha az atık malzeme kaldırma ve iş parçasında daha az bölgenin ısıdan etkilenmesine neden olurken aynı zamanda takım aşınmasını içermez. Üretim endüstrisinde lazer kesimi kullanan üreticilerin lazer işlemede verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve üretilen bileşenlerin son kalitesi gibi özellikler üreticilerin ilgisini çekmiştir. Üreticilerin ilgisini çeken bu iki beklenti, bütün malzeme ve kalınlığı için uygun olan lazer işleme parametrelerinin seçimi ile yönetilir. Bu kesme parametreleri genel olarak lazer gücü, kesme hızı, gaz basıncı, odak noktası ve frekansı içerir. İstenen kesim kalitesine ulaşmak için genellikle bu kesim parametrelerinin uygun kombinasyonlarının seçimi ile sağlanabilir. Ancak bu kesim parametreleri belirlemek için çok fazla çaba ve zaman harcansa da bazen uygun işleme koşulları bulunamayabilir [7-9]. Fakat farklı malzemeler ve farklı lazer uygulamaları (kesme, delme ve kaynak) için bu işlemler tekrarlanarak uygun kesme parametreleri bulunur ya da en uygun değere yakın değerler belirlemeye çalışılır.

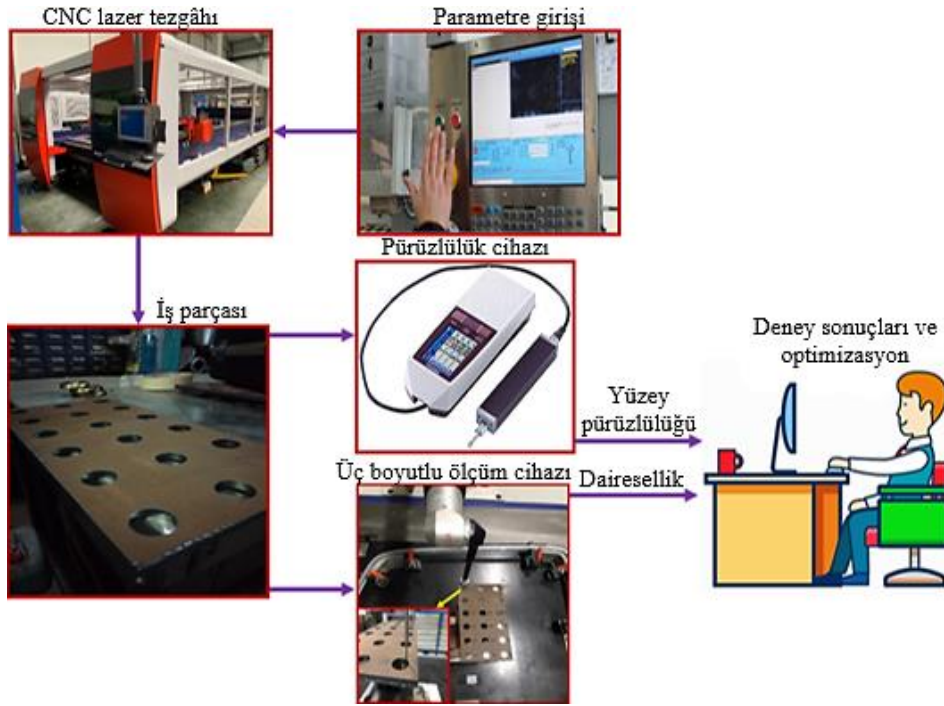
Lazer işleminin performansı temel olarak uygun kesme parametrelerinin seçimine bağlıdır. Lazer ışını profilinin yakınlaşan ve uzaklaşan şekli nedeniyle lazer işleme sırasında iş parçasında oluşan boşluk kerf genişliği olarak adlandırılmaktadır. Lazerle işleme sırasında kesme bölgesinden boşaltılan malzeme kerf genişliğini temsil etmektedir. Ayrıca kesme bölgesinden boşaltılan malzeme atık malzeme olduğu için kerf genişliğinin her zaman küçük değerlerde olması istenir [10]. Yapılan literatür araştırmasında lazer kesme parametrelerinin lazer kesim kalitesi üzerine etkilerini belirlemek için farklı çalışmaların deneysel ve istatistiksel olarak gerçekleştirildiği görülmektedir. Dubey ve Yadava tarafından yapılan çalışmada, silikon alaşımli sac malzemenin lazer kesme işleminde kerf genişliği ve malzeme kaldırma oranına etki eden optimum lazer kesme parametrelerinin belirlenmesi için birleşik Taguchi Method ve Cevap Yüzey Metodu kullanılmıştır [11]. Rajaram vd. 4130 çeliğinin CO<sub>2</sub> lazer kesim sisteminde kesilmesinde kesme parametrelerinin kerf genişliği, yüzey pürüzlülüğü, çizgi sıklığı ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutu üzerindeki birleşik etkileri incelenmiştir. Kesme parametrelerinin kerf

genişliği, yüzey pürüzlülüğü, çizgi sıklığı ve ısıdan etkilenen bölgenin boyutu üzerindeki etkisini tanımlayan modeller geliştirmek için regresyon analizi kullanılmıştır [12]. Lamikiz vd. yüksek mukavemetli çeliklerin lazerle kesilmesi için optimum çalışma alanlarını ve kesme koşullarını incelemiştir [13]. Yilbas vd. Ti-6Al-4V alaşımı, AISI 304, Inconel 625 ve alümina dahil olmak üzere çeşitli malzemelerin lazer kesilmesinde kesme parametrelerinin kesme boyunca kerf genişliği boyutundaki değişim etkilerini değerlendirmiştir. Ayrıca lazer kesme işlemi sırasında malzeme israfı açısından lazer kesimin çevresel etkisini belirlemek için yaşam döngüsü değerlendirmiştir [14]. Zaied vd. düşük karbonlu S235 sacın CO<sub>2</sub> lazerle kesilmesinde lazer gücünün ve kesme hızının bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülük parametrelerinin analizini yapmıştır. Varyans analizi ile lazer gücünün ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü üzerine etki oranları belirlenmiş ve basit bir matematiksel model önermiştir [15]. Davim vd. farklı polimer malzemelerin CO<sub>2</sub> lazer kesiminde kesme parametrelerinin (lazer gücü ve kesme hızı) kesim kalitesi üzerine (çapak yüksekliği ve ısıdan etkilenen bölge) etkisini değerlendirmiştir [16]. Pandeyve Dubey yaptıkları çalışmada, 1.4 mm kalınlığındaki Ti-6Al-4V levhanın lazer ile kesilmesinde hibrit deney tasarımı ve genetik algoritma yaklaşımını eş zamanlı olarak kullanarak kerf koniği ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden lazer kesme parametrelerini (gaz basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızı) optimize etmişlerdir [17]. Işık vd. St-37 malzemesinin lazerle kesilmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve kerf genişliğine etkilerini değerlendirmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine etki eden lazer kesme parametrelerinin etkilerini incelemek için sinyal/gürültü oranı, varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi kullanılmıştır [18].

Literatür taramasında, lazer işleme endüstrisinde farklı malzemeler üzerinde farklı kesme parametrelerinin lazer kesim kalitesi üzerine etkilerini incelemek için çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Ancak Hardox450 çeliğinin lazerle delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkilerinin araştırılması ile ilgili kapsamlı bir çalışmanın yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı, Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde kesme parametrelerinin delik kalitesi üzerine etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu hedeflenmiştir.

## II. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada 140x290x6 mm ebatlarında ve 450 HB sertliğe sahip Hardox 450 çeliği kullanılmıştır. Hardox 450 çeliğinin kimyasal bileşimi %0,26 C, %0,70 Si, %1,60 Mn, %0,025 P, %0,010 S, %1,40 Cr, %1,50 Ni, %0,60 Mo, %0,005 B'den oluşmuştur. Lazer delme işlemleri, Bystronic-BySprint Pro 4020 marka CNC lazer kesim tezgâhında yapılmıştır. Lazer delme işlemlerinde Oksijen (O<sub>2</sub>) gazı kullanılmış, lens çapı 38.04 mm ve nozul çapı 1 mm olarak seçilmiştir. Lazer delme işlemi sonrası deliklerin yüzey pürüzlülükleri delik eksenine paralel her 90° 'de bir ölçüm yapılarak toplamda dört ölçüm yapılmıştır. Bu dört ölçümün aritmetik ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü hesaplanmıştır. Lazer delme sonrası iş parçası üst ve alt yüzeylerde oluşan deliklerin dairesellikleri 3 boyutlu ZEISS marka koordinat ölçüm cihazında yapılmıştır. Deliklerin çevresinde sekiz noktadan yapılan ölçümlerle alt ve üst dairesellikler belirlenmiştir. Şekil 1'de verilen şematik deney düzeneği izlenerek deneyler yapılmıştır.



Şekil 1. Yapılan çalışmanın şematik deney görünümü

Lazer kesme işlemi için deney tasarımı, Taguchi'nin  $L_{18}$  ortogonal dizisi göre yapılmıştır. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 1'de verilmiştir. Alt ve üst delik dairesellik toleranslarının belirlenmesinde S/N oranı kullanılmıştır. S/N oranlarına bağlı olarak en küçük yüzey pürüzlülüğünün, alt ve üst delik dairesellik tolerans değerlerinin hesaplanmasında Eşitlik 1'de verilen "en küçük en iyidir" denklemi kullanılmıştır.

En küçük en iyi:

$$S/N = -10 \log(1/n \sum_{i=1}^n Y_i^2) \quad (1)$$

Ayrıca lazer kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile alt ve üst delik dairesellik toleransları üzerine etki oranlarının belirlenmesinde Varyans Analizinden (Anova) yararlanılmıştır.

Tablo 1. Lazer delme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri

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

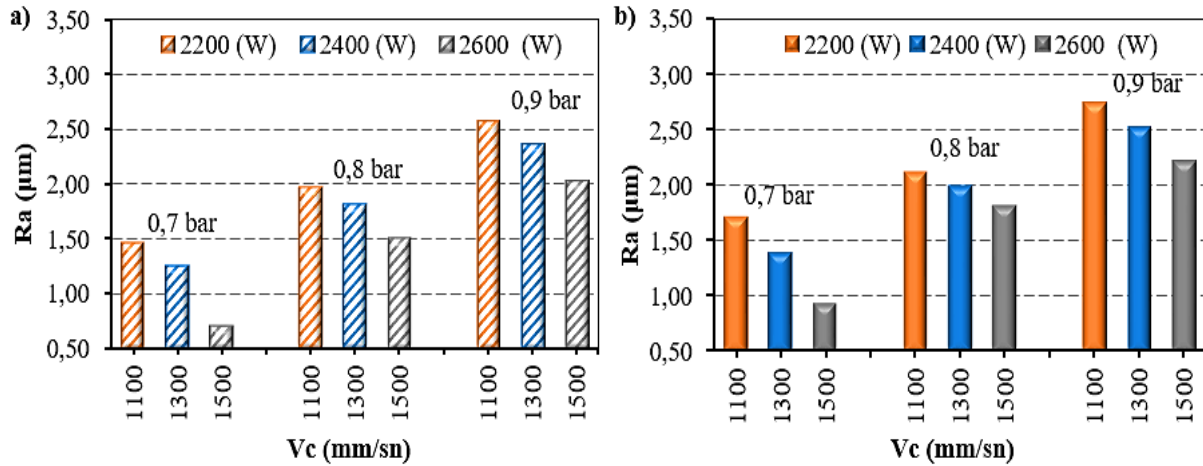
### III. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### A. Yüzey Pürüzlülüğünün Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde iki farklı odak noktasına, üç farklı gaz basıncına, üç farklı kesme hızına ve üç farklı lazer gücüne göre yüzey pürüzlülüğü değişimi Şekil 1'deki çubuk grafiklerinde verilmiştir.

Şekil 1a'da -1 mm odak noktasında Hardox 450 çeliğinin üç farklı gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücünden delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değişimi verilmiştir. 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yüzey pürüzlülüğü 1,471µm ölçülmüştür. 0,7 bar gaz basıncında kesme hızının 1500 mm/sn ve lazer gücünün 2600 W çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğü %51,19 oranında azalarak 0,718 olmuştur. Gaz basıncının 0,8 bar ve 0,9 bar çıkarılması ile 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde yüzey pürüzlülüğü sırası

ile %34,47 (1,978 $\mu$ m) ve %75,25 (2,578 $\mu$ m) oranlarında artma olmuştur. Ayrıca 0,8 bar ve 0,9 bar gaz basıncında kesme hızının ve lazer gücünün artırılmasıyla yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı görülmüştür.



Şekil 1. Lazer kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi a) -1 mm odak noktası, b) -0,5 mm odak noktası

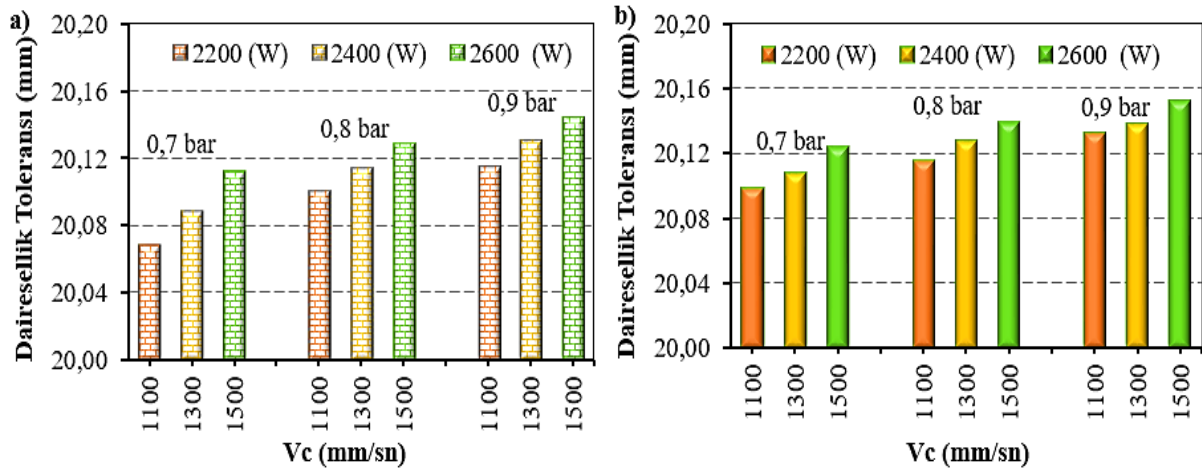
Şekil 1b'de -0,5 mm odak noktasında Hardox 450 çeliğinin üç farklı gaz basıncında, üç farklı kesme hızında ve üç farklı lazer gücünde delinmesinde yüzey pürüzlülüğünün değişimi verilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişim genel olarak -1 mm odak noktasında elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimle benzerlik göstermiştir. Kesme hızının ve lazer gücünün artırılması yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olurken, gaz basıncının artması yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmada genel olarak odak noktasının azalması yüzey pürüzlülüğünün azalması ile sonuçlanmıştır.

Yapılan çalışmada genel olarak sabit gaz basıncında kesme hızının ve lazer gücünün artırılmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Bunun nedeni, kesme hızı arttıkça lazer ışını ve iş parçası malzemesi arasındaki etkileşim süresinin azalması, iş parçası yüzeyinde biriken ısı miktarının azalmasına neden olur, bu da yüzey pürüzlülüğünün azalması ile sonuçlanır. Ayrıca düşük kesme hızlarında, iş parçası üzerinde ısı yayılımının daha fazla olması yüzey bozulmasına neden olan daha geniş olukların oluşmasına neden olmaktadır. Lazer kesme işlemleri düşük güç seviyelerinde daha az kararlı olması yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine neden olmaktadır. Ayrıca gaz basıncının artırılmasıyla, kesilen yüzeyin ekzotermik nedenli yanması artar ve ergimiş metali uzaklaştırmak için gerekli olan sürükleme kuvveti artarak daha yüksek yüzey pürüzlülüğünün oluşmasına neden olur [19-21].

### B. Delik Toleranslarının değerlendirilmesi

Lazerle, malzemelerin delinmesi giderek daha önemli bir teknolojik araç haline gelmiştir. Lazerle delme geleneksel delme tekniklerine göre takım aşınmasının olmaması, yüksek delme oranı elde edilmesi ve iş parçasının yüzeyine yüksek açılarda delikler delinebilir olması gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı farklı lazer kesme parametreleri kullanılarak Hardox 450 çeliğinin lazerle delme işleminde deliklerin üst ve alt delik dairesellik toleransları incelenmiştir.

Şekil 2'de Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde lazer kesme parametrelerinin üst delik çaplarındaki dairesellik toleransına etkisi verilmiştir. Şekil 2a'da -1 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,069 mm ile en düşük üst delik çapı ölçülmüştür. Kesme hızının ve lazer gücünün sırası ile 1500 mm/sn ve 2600 W çıkarılması ile delik çapında %0,22 (20,113 mm) oranında artma görülmüştür. Gaz basıncının sırası ile 0,8 bar ve 0,9 bar çıkarılması ile bütün deney kombinasyonlarında üst delik çaplarının arttığı görülmüştür.



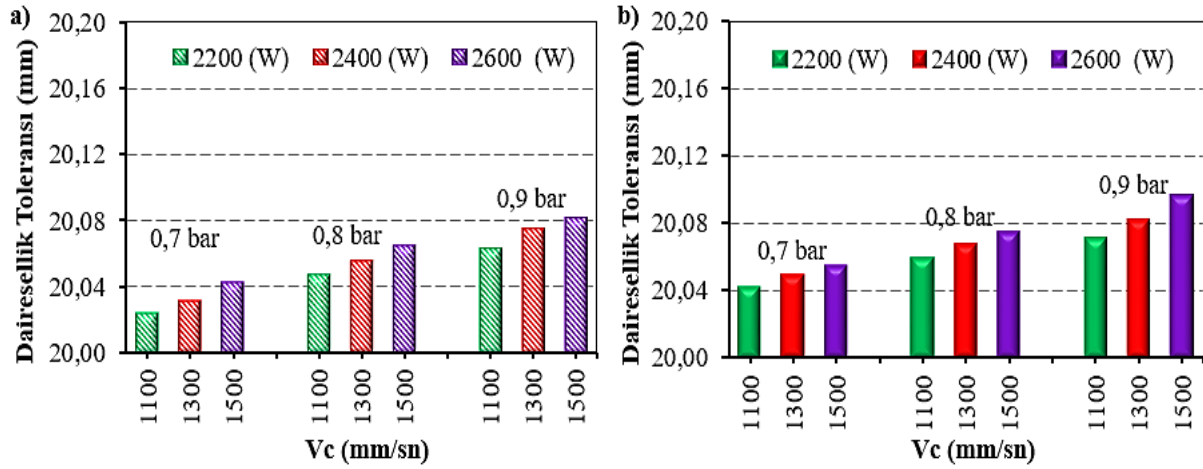
Şekil 2. Lazer kesme parametrelerinin üst delik çaplarındaki dairesellik toleransına etkisi a) -1 mm odak noktası, b) -0,5 mm odak noktası

Şekil 2b’de -0,5 mm odak noktasında Hardox 450 çeliğinin üç farklı gaz basıncında, üç farklı kesme hızında ve üç farklı lazer gücünde delinmesinde üst delik çaplarındaki dairesellik toleransına etkisi verilmiştir. 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,098 mm ölçülmüştür. 0,9 bar gaz basıncında, 1500 mm/sn ve 2600 W lazer gücünde delik çapı maksimum değere ulaşarak 20,152 mm olmuştur. Yapılan diğer deneylerde gaz basıncının, kesme hızının ve lazer gücünün artması ile delik çaplarının arttığı görülmektedir. Ayrıca bütün lazer delme deneylerinde odak noktasının azalması ile delik çaplarının azaldığı görülmüştür.

Hardox 450 çeliğinin lazerle delinmesinde lazer kesme parametrelerinin alt delik çaplarındaki dairesellik toleransına etkisi Şekil 3’de verilmiştir. Şekil 3a’da -1 mm odak noktasında, 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,024 mm ile en düşük alt delik çapı ölçülmüştür. Kesme hızının ve lazer gücünün sırası ile 1500 mm/sn ve 2600 W çıkarılması ile delik çapında % 0,095 (20,043 mm) oranında artma görülmüştür. Gaz basıncının sırası ile 0,8 bar ve 0,9 bar çıkarılması ile bütün deney kombinasyonlarında alt delik çaplarının arttığı görülmüştür.

Şekil 3b’de -0,5 mm odak noktasında Hardox 450 çeliğinin 0,7 bar gaz basıncında, 1100 mm/sn kesme hızında ve 2200 W lazer gücünde delik çapı 20,042 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının kesme hızının ve lazer gücünün artırılması alt delik çaplarındaki dairesellik toleransının artmasına neden olmuştur.-0,5 mm odak noktasında kesme parametrelerinin maksimum değere çıkarılması ile yapılan deneyde (0,9 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn ve 2600 W lazer gücü) alt dairesellik toleransının da 20,096 ile maksimum değere ulaşmıştır.

Yapılan çalışmada, düşük gaz basıncı, kesme hızı ve lazer gücünde daha düşük üst ve alt delik toleransları elde edilmiştir. Kesme hızının azalması iş parçası yüzeyinde yüksek sıcaklıkta oksidasyon reaksiyonunun gerçekleştiği süreyi uzatır. Lazer gücünün de düşük olması iş parçasının üzerinde ısı birikimini azaltacaktır. Bu durumda ergimiş metalin düşük gaz basıncında kesme bölgesinden uzaklaştırılmaması daha düşük üst ve alt delik toleranslarının elde edilmesi ile sonuçlanmıştır [22].



Şekil 3. Lazer kesme parametrelerinin alt delik çaplarındaki boyutsal tamlığa etkisi a) -1 mm odak noktası, b) -0,5 mm odak noktası

### C. S/N oranlarının Analizi

Yapılan deneysel çalışmanın amacı, lazer delme işlemi sonucu ölçülen Ra, ÜDDT ve ADDT en düşük değerlerini elde etmek için lazer kesme parametrelerini optimize etmektir. Lazer kesme parametrelerinin optimizasyonunda S/N oranı kullanılmıştır. S/N oranlarının hesaplanmasında Denklem (1) verilen Taguchi'nin "En küçük en iyi" yaklaşımı seçilmiştir [23,24]. Tablo 2 lazer delme işlemi sonrası Ra, ÜDDT ve ADDT için ölçülen sonuçları ve bunlar için hesaplanan S/N oranlarını göstermektedir. Tablo 2'deki verilere göre  $T_{Ra}$ ,  $T_{ÜDDT}$  ve  $T_{ADDT}$  ortalamaları sırası ile 1,839  $\mu\text{m}$ , 20,118 mm 20,060 mm iken, Ra-S/N, ÜDDT-S/N ve ADDT-S/N oranlarının aritmetik ortalamaları sırası ile -4,8378dB, -26,0720 dB ve -26,0467 hesaplanmıştır.

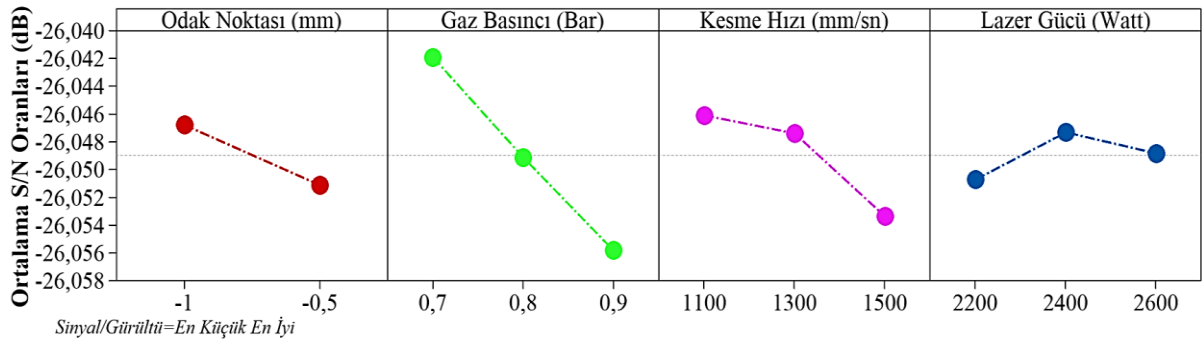
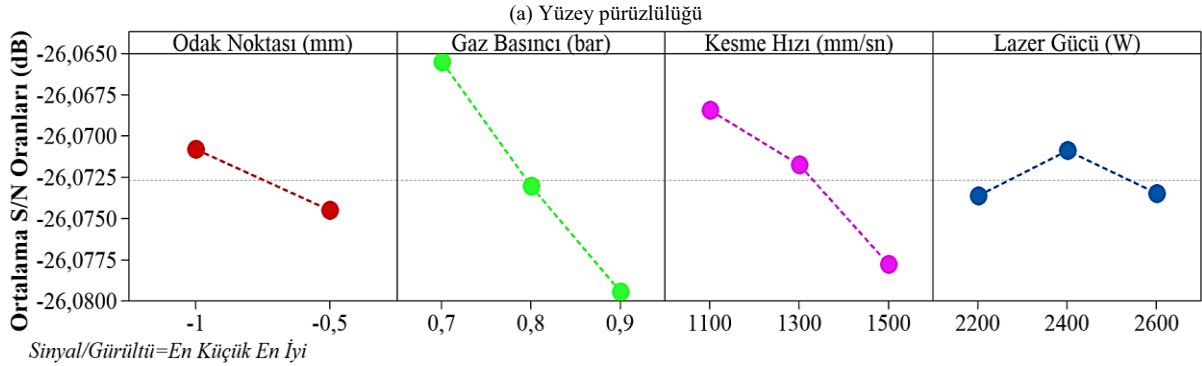
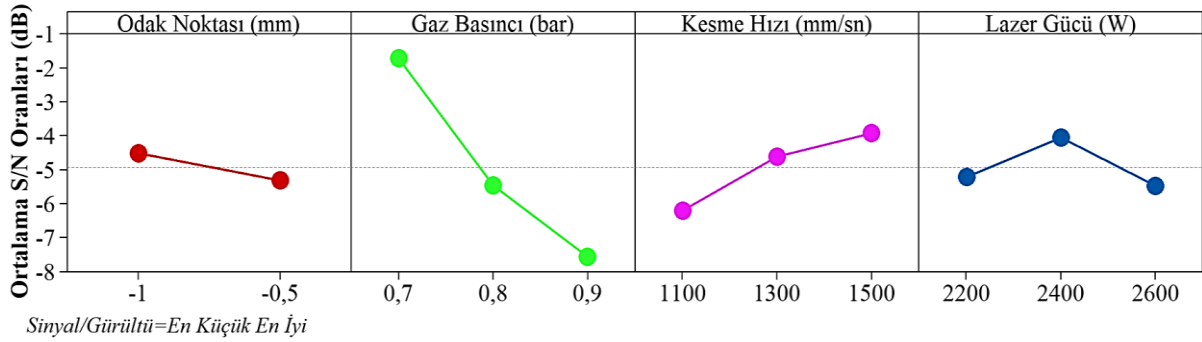
Tablo 2. Deneysel sonuçları ve  $L_{18}$  ortogonal dizisine karşılık gelen S / N oranı

Deneysel No	Lazer Kesme Parametreleri				Ra ( $\mu\text{m}$ )	Ra-S/N (dB)	ÜDDT (mm)	ÜDDT-S/N (dB)	ADDT (mm)	ADDT-S/N (dB)
	Odak Noktası (mm)	Gaz Basıncı (bar)	Kesme Hızı (mm/sn)	Lazer Gücü (W)						
1	-1	0,7	1100	2200	1,471	-3,35225	20,069	-26,0505	20,024	-26,0310
2		0,7	1300	2400	1,255	-1,97287	20,089	-26,0592	20,032	-26,0345
3		0,7	1500	2600	0,718	2,87751	20,113	-26,0695	20,043	-26,0393
4		0,8	1100	2200	1,978	-5,92453	20,101	-26,0644	20,048	-26,0414
5		0,8	1300	2400	1,822	-5,21097	20,114	-26,0700	20,056	-26,0449
6		0,8	1500	2600	1,518	-3,62544	20,129	-26,0764	20,065	-26,0488
7		0,9	1100	2400	2,578	-8,22566	20,115	-26,0704	20,063	-26,0479
8		0,9	1300	2600	2,371	-7,49863	20,131	-26,0773	20,075	-26,0531
9		0,9	1500	2200	2,029	-6,14564	20,145	-26,0833	20,082	-26,0561
10		0,7	1100	2600	1,705	-4,63449	20,098	-26,0631	20,042	-26,0388
11		0,7	1300	2200	1,388	-2,84779	20,107	-26,0669	20,049	-26,0419
12		0,7	1500	2400	0,927	0,65841	20,124	-26,0743	20,054	-26,0440
13	-0,5	0,8	1100	2400	2,108	-6,47741	20,115	-26,0704	20,059	-26,0462
14		0,8	1300	2600	1,985	-5,95521	20,127	-26,0756	20,067	-26,0496
15		0,8	1500	2200	1,802	-5,11510	20,139	-26,0808	20,074	-26,0527
16		0,9	1100	2600	2,728	-8,71689	20,132	-26,0777	20,071	-26,0514
17		0,9	1300	2200	2,516	-8,01421	20,138	-26,0803	20,082	-26,0561
18		0,9	1500	2400	2,213	-6,89963	20,152	-26,0864	20,096	-26,0622

Lazer delme deneyleri sonucu ölçülen Ra, ÜDDT ve ADDT verileri için kesme parametrelerinin etkisinin gösteren S/N yanıt tablosu Tablo 3'de ve optimum kesme parametrelerini gösteren S/N ana etki grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Tablo 3'deki S/N yanıt tablosu ve Şekil 4'deki S/N ana etki grafiği incelendiğinde Ra için ideal kesme parametreleri seviyeleri  $A_1B_1C_3D_3$  (A odak noktası -1 mm (seviye 1), B gaz basıncı 0,7 bar (seviye 1), C kesme hızı 1500 mm/sn (seviye 3) ve D lazer gücü 2600 W (seviye 3), ÜDDT ve ADDT ideal seviyeler  $A_1B_1C_1D_1$  (A odak noktası -1 mm (seviye 1), B gaz basıncı 0,7 bar (seviye 1), C kesme hızı 1100 mm/sn (seviye 1) ve D lazer gücü 2200 W (seviye 1) olarak belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Lazer delme deneyleri sonucu Ra, ÜDDT ve ADDT için S/N yanıt tablosu

Lazer Kesme Parametreleri		Seviyeler			Delta
		Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	
Ra ( $\mu\text{m}$ )	ON (mm)	-4,342	-5,334	-	0,992
	GB (bar)	-1,545	-5,385	-7,583	6,038
	Vc (mm/sn)	-6,222	-5,250	-3,042	3,180
	LG (W)	-5,233	-4,688	-4,592	0,641
ÜDDT (mm)	ON (mm)	-26,0690	-26,0751	-	0,0060
	GB (bar)	-26,064	-26,073	-26,079	0,015
	Vc (mm/sn)	-26,066	-26,072	-26,078	0,012
	LG (W)	-26,071	-26,072	-26,073	0,002
ADDT (mm)	ON (mm)	-26,0441	-26,0492	-	0,0051
	GB (bar)	-26,0382	-26,0473	-26,0545	0,0162
	Vc (mm/sn)	-26,0428	-26,0467	-26,0505	0,0077
	LG (W)	-26,0465	-26,0466	-26,0468	0,0003



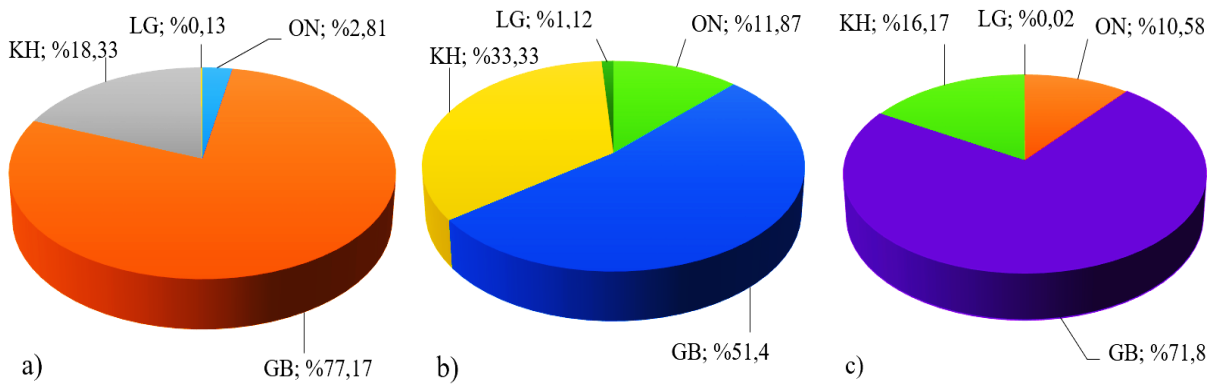
**Şekil 4.** Lazer delme işleminde kesme parametrelerine ait S/N ana etki grafiği



#### D. Varyans Analizi (ANOVA)

Varyans (ANOVA) analizi lazer delme işleminde kullanılan kesme parametreleri kombinasyonlarının birbiriyle olan etkileşimi ile Ra, ÜDDT ve ADDT üzerine etki oranlarının belirlenmesi için kullanılmıştır. Lazer delme işlemi sonucu Ra, ÜDDT ve ADDT için varyans analiz sonuçları Tablo 4’de verilmiştir.

Deney sonuçları %95’lik bir güven seviyesinde değerlendirilmiş ve analiz sonuçlarında P olasılık değeri 0.05’den küçük olursa lazer kesme parametrenin Ra, ÜDDT ve ADDT etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu bildirilmiştir[25,26]. Varyans analizinde lazer delme parametrelerinin önemi, her delme parametresinin F değeri ile belirlenir. Her bir lazer delme parametresinin, Ra, ÜDDT ve ADDT için yüzde (%) katkı oranları Şekil 5’de görülmektedir. Varyans analizi sonuçlarına göre Ra, ÜDDT ve ADDT’ne etki eden en önemli lazer delme parametresi sırası ile %77,17, %51,40 ve %71,80 ile gaz basıncı olmuştur.



Şekil 5. Lazer delme parametrelerinin Ra, ÜDDT ve ADDT üzerine yüzde (%) katkı oranları, (a) Yüzey pürüzlülüğü, (b) Üst delik çaplarındaki dairesellik toleransı ve (c) Alt delik çaplarındaki dairesellik toleransı

Tablo 4. Lazer delme deneyleri sonucu Ra, ÜDDT ve ADDT için Varyans sonuçları.

Kesme Parametreleri	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	P Değeri	Katkı Oranı (%)
<b>Yüzey Pürüzlülüğü (µm)</b>						
Odak Noktası (mm)	1	0,14797	0,14797	18,04	0,002	2,81
<b>Gaz Basıncı (bar)</b>	<b>2</b>	<b>4,05728</b>	<b>4,05728</b>	<b>247,39</b>	<b>0,000</b>	<b>77,17</b>
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,96381	0,96381	58,77	0,000	18,33
Lazer Gücü (W)	2	0,00662	0,00662	0,40	0,678	0,13
Hata	10	0,08200	0,08200			1,56
Toplam	17	5,25768				100
<b>Üst Delik Boyutsal Tamlık (mm)</b>						
Odak Noktası (mm)	1	0,000882	0,000882	52,36	0,000	11,87
<b>Gaz Basıncı (bar)</b>	<b>2</b>	<b>0,003819</b>	<b>0,003819</b>	<b>113,35</b>	<b>0,000</b>	<b>51,40</b>
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,002476	0,002476	73,51	0,000	33,33
Lazer Gücü (W)	2	0,000083	0,000083	2,48	0,134	1,12
Hata	10	0,000168	0,000168			2,27
Toplam	17	0,007429				100
<b>Alt Delik Boyutsal Tamlık (mm)</b>						
Odak Noktası (mm)	1	0,000624	0,000624	74,41	0,000	10,58
<b>Gaz Basıncı (bar)</b>	<b>2</b>	<b>0,004236</b>	<b>0,004236</b>	<b>252,48</b>	<b>0,000</b>	<b>71,80</b>
Kesme Hızı (mm/sn)	2	0,000954	0,000954	56,87	0,000	16,17
Lazer Gücü (W)	2	0,000001	0,000001	0,09	0,918	0,02
Hata	10	0,000084	0,000084			1,42
Toplam	17	0,005900				100

#### IV. SONUÇLAR

Lazer ile delme işleminde kullanılan kesme parametrelerinin seçimi lazer delme işleminin kalitesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada HARDOX 450 çeliğinin lazer ile delme işlemi sonucu kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve delik çaplarındaki değişimler üzerine etkileri incelenmiştir. Deneyler ve analizler sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,718 µm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1500 mm/sn kesme hızı ve 2600 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü üzerine en etkin parametre %77,17 ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile %18,33 kesme hızı, %2,81 ile odak noktası ve %0,13 lazer gücü takip etmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en küçük üst delik çapı 20,069 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu üst delik çaplarındaki değişim tamlık üzerine en etkin parametre %51,40 ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile %33,33 kesme hızı, %11,87 odak noktası ve %1,12 ile lazer gücü takip etmiştir.
- Hardox 450 çeliğinin delinmesi sonucu en küçük alt delik çapı 20,024 mm için optimum kesme parametreleri -1 mm odak noktası, 0,7 bar gaz basıncı, 1100 mm/sn kesme hızı ve 2200 W lazer gücü olarak belirlenmiştir.
- Varyans analizi sonucu alt delik boyutsal tamlık üzerine en etkin parametre %71,80 ile gaz basıncı olurken bunu sırası ile %16,17 kesme hızı, %10,58 odak noktası ve %0,02 ile lazer gücü takip etmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Adamiak, M., Górka, J., & Kik, T., (2009). Comparison of abrasion resistance of selected constructional materials, *The Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 37(2), 375-380.
- [2] Mindivan, H., (2013). Effects of combined diffusion treatments on the wear behaviour of hardox 400 steel, *Procedia Engineering*, 68, 710-715.
- [3] Yılmaz, D., Aktaş, B., Çalık, A., & Aytar, O. B., (2019). Boronizing effect on the radiation shielding properties of Hardox 450 and Hardox HiTuf steels, *Radiation Physics and Chemistry*, 161, 55-59.
- [4] Aktaş, B., Toprak, M., Çalık, A., & Tekgüler A. (2020). Effect of pack-boriding on the tribological behavior of Hardox 450 and HiTuf Steels, *Reviews on Advanced Materials Science*, 59(1), 314-321.
- [5] Dubey, A. K., & Yadava, V., (2008). Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1.3), 412-418.
- [6] Khoshaim, A. B., Elsheikh, A. H., Moustafa E. B., Basha, M., & Showaib E. A., (2021). Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics, *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 235-246.
- [7] Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., & Cheraghi S. H., (2003). CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(4), 351-358.
- [8] Rajendran, N., Pate, M.B., (1988). The effect of laser beam velocity on cut quality and surface temperature, *American Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Division*, vol. 104, pp. 121-127.
- [9] Neimeyer, R., Smith, R. N., & Kaminski D. A. (1993). Effects of operating parameters on surface quality for laser cutting of mild steel, *Journal of Engineering for Industry*, 115, 359-366.
- [10] Wandera, C. (2006). Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam, *M.S. Thesis, Lappeenranta University of Technology*, 127-128, Finland.
- [11] Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, *Optics&Laser Technology*, 40(3), 562-570.
- [12] Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., & Cheraghi, S. H. (2003). CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(4), 351-358.
- [13] Lamikiz, A., Lacalle, L. N. L., Sanchez, J. A., Pozo, D., Etayo, J. M., & Lopez, J. M. (2005). CO<sub>2</sub> laser cutting of advanced high strength steels (AHSS), *Applied Surface Science*, 242(3-4), 362-368.
- [14] Yilbas, B. S., Shaukat, M. M., & Ashraf, F. (2017). Laser cutting of various materials: Kerf width size analysis and life cycle assessment of cutting process, *Optics&Laser Technology*, 93, 67-73.
- [15] Zaided, M., Bayraktar, E., Katundi, D., Boujelbene, M., & Miraoui, I., (2012). Effect of laser cutting parameters on surface quality of low carbon steel (S235), *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 54,(1), 128-134.
- [16] Davim, J. P., Barricas, N., Conceicao, M., & Oliveira, C., (2008). Some experimental studies on CO<sub>2</sub> laser cutting quality of polymeric materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3), 99-104.

- [17] Pandey, A. K., & Dubey, A. K. (2012). Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet, *Optics&Laser Technology*, 44(6), 1858-1865.
- [18] Işık, R., Özlü, B., & Demir, H., (2021). St-37 Malzemesinin lazer ile kesme işleminde seçilen parametrelerin etkisinin deneysel ve istatistiksel olarak incelenmesi, *Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi*, 33(1), 161-171.
- [19] Janković, P., Madić, M., Radovanović, M., Petković, D., & Mladenović, S. (2019). Optimization of surface roughness from different aspects in high-power CO<sub>2</sub> laser cutting of AA 5754 aluminum alloy, *Arabian Journal for Science and Engineering*, (44),10245-10256.
- [20] Özlü, B., (2021). Experimental and statistical investigation of the effects of cutting parameters on kerf quality and surface roughness in laser cutting of Al 5083 alloy, *Surface Review and Letters*, 28(20), 1-18.
- [21] Araujo, D.,Carpio, F. J., Mendez, D., Garcia, A. J., Villar, M. P., Garcia, R., Jimenez, D., & Rubio, L. (2003). Microstructural study of CO<sub>2</sub> laser machined heat affected zone of 2024 aluminum alloy, *Applied Surface Science*, 208, 210-217.
- [22] Madić, M., & Radovanović, M. (2013). Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO<sub>2</sub> laser cutting of mild steel, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 35, 103-110.
- [23] Akgün, M., & Demir, H. (2021). Estimation of surface roughness and flank wear in milling of Inconel 625 superalloy, *Surface Review and Letters*, 28(4), 1-12.
- [24] Yaka, H. (2021). Measurement of surface quality and optimization of cutting parameters in slot milling of GFRP composite materials with different fiber ratios produced by pultrusion method, *Surface Review and Letters*, 28(10), 1-18.
- [25] Nas, E., & Akıncıoğlu, S. (2019). Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 115-126.
- [26] Nas, N., & Altan Ö. N. (2019). Optimization the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools, *Surface Review and Letters*, 1950177, 1-14.