

## St-37 Malzemesinin Lazer ile Kesme İşleminde Seçilen Parametrelerin Etkisinin Deneysel ve İstatiksel Olarak İncelenmesi

Rümeysa IŞIK<sup>1</sup>, Barış ÖZLÜ<sup>2\*</sup>, Halil DEMİR<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup> İmalat Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye

<sup>2\*</sup> Makine Bölüm, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Aksaray Üniversitesi, Aksaray, Türkiye

<sup>1</sup>rumeysaa.03@hotmail.com , <sup>2\*</sup>barisozlu@aksaray.edu.tr, <sup>3</sup>hdemir@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 14/07/2020;

Kabul/Accepted: 15/10/2020)

**Öz:** Deneysel çalışmada, St-37 malzemesinin lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğünü (Ra) ve kerf genişliğini (kW) etkileyen parametreler deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir. Lazer kesme deneylerinin maliyetini azaltmak için lazer kesme parametrelerinin tasarımı Taguchi L32 (2x4x4) dikey dizilimine göre oluşturulmuştur. Lazer kesme parametreleri olarak iki farklı frekans (2500 Hz ve 3500 Hz), dört farklı gaz basıncı (0,8 bar, 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar) ve dört farklı kesme hızı (10 mm/s, 16 mm/s, 22 mm/s ve 28 mm/s) belirlenmiştir. Lazer kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkilerinin incelenmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı, varyans analizi (ANOVA) ve regresyon analizi kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda, yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için optimum seviyeler sırası ile A2B1C4 ve A1B1C4 olarak bulunmuştur. Varyans analiz sonuçları %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiş olup yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için en etkili parametrenin sırası ile % 55,78 ile frekans ve % 54,26 gaz basıncı olduğu belirlenmiştir. Regresyon analizleri incelendiğinde ise yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için oluşturulan matematiksel modelinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için belirleme katsayısı (R2) değeri sırasıyla % 88,28 ve % 91,81 olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** St-37 malzeme, lazer kesme, yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği, Taguchi.

### Experimental and Statistical Investigation of the Effect of the Parameters Selected in Cutting Process with Laser St-37 Material

**Abstract:** In the experimental study, the laser cutting parameters affecting the surface roughness (Ra) and kerf width (kW) of the St37 material during laser cutting were investigated experimentally and statistically. To reduce the cost of laser cutting experiments, the design of laser cutting parameters was created according to the Taguchi L32 (2x4x4) vertical array. Two different frequencies (2500 Hz and 3500 Hz), four different gas pressures (0.8 bar, 0.9 bar, 1 bar and 1.1 bar) and four different cutting speeds (10 mm/s, 16 mm/s, 22 mm/s and 28 mm/s) were determined as laser cutting parameters. Signal/Noise (S/N) ratio, variance analysis (ANOVA) and regression analysis were used to examine the effects of laser cutting parameters on surface roughness and kerf width. As a result of the study, optimum levels for surface roughness and kerf width were found as A2B1C4 and A1B1C4, respectively. Variance analysis results were carried out at 95% confidence level, the most effective parameter for surface roughness and kerf width was determined to be 55.78%, frequency and 54.26% gas pressure, respectively. When the regression analysis is examined, the coefficient of determination (R2) value for the surface roughness and kerf width of the mathematical model created for the surface roughness and kerf width was determined as 88.28% and 91.81%, respectively.

**Key words:** St-37 material, laser cutting, surface roughness, kerf width, Taguchi.

#### 1. Giriş

Gelişmiş işleme yöntemleri arasında lazer kesim, çok farklı malzemelerin işlenmesinde kullanılan en yaygın termal bazlı işleme yöntemlerinden biri olarak metal endüstrisinde yerini almaktadır. Lazer işleme teknolojisi, kullanım kolaylığı, yüksek hassasiyet, düşük maliyet, yüksek parça kalitesi, yüksek işleme hızı ve daha az parça fitesi nedeniyle imalat endüstrisinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu özelliklere ilaveten, temassız olarak kesilmesi zor malzemeler, kırılğan malzemeler, iletken ve iletken olmayan malzemeler, yumuşak ve ince malzemeler gibi gelişmiş mühendislik malzemelerin işlenmesi için kullanılmaktadır [1-3]. Bununla birlikte lazerle işleme sırasında, kesme bölgesinde iş parçası yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Yüksek ısıya maruz kalan bölgelerde aşırı termal gerilmelerin oluşması parça kalitesinin düşmesine neden olmaktadır [4]. Lazer işleme sürecinde, parça yüzeyi boyunca odaklanan lazer ışımı, malzeme ergitilene kadar hızlı bir şekilde ısınmasına neden

\* Sorumlu yazar: [barisozlu@aksaray.edu.tr](mailto:barisozlu@aksaray.edu.tr). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-7351-2902, <sup>2</sup> 0000-0002-8594-1234, <sup>3</sup> 0000-0002-9802-083X

olmaktadır. Erimiş metal daha sonra yüksek basınçlı bir gaz yardımıyla işleme bölgesinden uzaklaştırılarak kesilmiş dar bir kerf genişliği oluşturmaktadır [5]. Lazer kesme işlemi sırasında iş parçasında meydana gelen boşluğa kerf genişliği denilmektedir. Kerf genişliği iş parçasından çıkarılan malzemeyi göstermekte ve çıkarılan malzeme atık malzeme olacağından kerf genişliğinin daima küçük olması istenmektedir. Ayrıca alt kerf genişliği genelde üst kerf genişliğinden daha dar bir ölçüye sahip olmaktadır [6].

Lazer işleme teknolojisinde, lazer işleme sürecinin ve üretilen parçanın kalitesini etkileyen işleme parametrelerinin daha iyi anlaşılması için birçok teorik ve deneysel araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. 0,7 mm kalınlığındaki IS 737 (40800 kalite) alüminyum alaşımlı düz sac malzemenin lazer kesimi sırasında kesim kalitesini etkileyen parametreleri araştırmıştır. Çalışmada parametrelerin modellenmesi için Taguchi ve tepki yüzeyi modeli kullanılmıştır. Lazer işleme parametresi olarak oksijen basıncı, darbe genişliği, darbe frekansı ve kesme hızı tanımlanmıştır. Regresyon sonuçlarına göre işleme parametrelerinin Taguchi ve tepki yüzeyi model için anlamlı olduğunu, tepki yüzeyi modelinde darbe genişliği ve darbe frekansının kerf koniği üzerinde diğer parametrelere göre daha az etkisi olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, kerf koniği için frekans değerinin etkisinin daha az olduğu belirlenirken, yüzey pürüzlülüğü için etkin parametrenin gaz basıncı olduğu belirlenmiştir [7]. Thawari ve arkadaşları, 1 mm kalınlığında Hastelloy-X süper alaşım sac malzemenin lazer kesimi sırasındaki anahtar işlem parametrelerinin etkisini incelemiştir. Lazer işleme parametresi olarak darbe enerjisi, darbe frekansı, darbe süresi ve kesme hızı kullanılmıştır. Lazer kesme işleminde, malzeme kalınlığı için lazer işleme parametresi olarak darbe enerjisi ve kesme hızı kombinasyonu kullanılmaktadır. Ayrıca darbe süresi lazer kesiminde hayati bir rol oynamaktadır. Çalışmanın sonucunda frekans değeri arttıkça kerf genişliğinin arttığı, daha kısa darbe süresi, daha uzun süreli darbeye kıyasla daha düşük kerf koniği ile genişliğe neden olduğu belirlenmiştir [8]. Çaydaş ve Haşçalık yaptıkları çalışmada, gri ilişkisel analize dayanan çoklu performans özelliklerine sahip St-37 çeliğin lazer kesim işleminin optimizasyonu için etkili bir yaklaşım sunmuştur. Deney tasarımıdaki en iyi faktör seviyesini belirlemek için Taguchi yöntemine dayanan L16 dikey dizini kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Lazer ile işlemede kullandıkları parametreleri dört farklı güç ve dört farklı kesme hızı olarak belirlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve ısıdan etkilenen bölgenin genişliği gibi performans özelliklerinin bu çalışma tarafından önerilen yöntem kullanılarak iyileştirildiği belirlenmişlerdir [9]. Madic ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, 2 mm kalınlığındaki DIN S355J2G3 sac malzeme CO<sub>2</sub> lazer kesiminde yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için Taguchi yöntemi kullanmıştır. Deneylerde işleme parametreleri olarak kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncı seçilmiştir. Deney tasarımı Taguchi'nin L25 dikey dizisine göre tasarlanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, kesme hızının ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametreler olduğu, lazer gücünün etkisinin ise yüzey pürüzlülüğüne etkisinin çok daha az olduğu belirlenmiştir [3]. Pandey ve Dubey, 1,4 mm kalınlığındaki titanyum alaşımlı sacın (Ti-6Al-4V) lazer kesim işleminde kerf konikliği ve yüzey pürüzlülüğünü en aza indirerek geometrik doğruluğu ve yüzey kalitesini iyileştirmek amacıyla lazer işleme davranışını incelemiştir. Lazer kesme parametresi olarak gaz basıncı, darbe genişliği, frekansı ve kesme hızı değerleri kullanılmıştır. Taguchi L27 dikey dizi deney tasarımı yapılarak elde edilen veriler, kerf koniği ve yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağı tabanlı modellerinin geliştirilmesi için kullanılmıştır. Sonuç olarak, yapay sinir ağı tabanlı modellerin öngördüğü kerf konikliği ve yüzey pürüzlülük değerleri, deneysel değerlere yakın bulunmuştur. Ayrıca yaptıkları çalışmada kerf genişliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün azaltıldığı belirtilmişlerdir [10]. Dautam ve Mishra yaptıkları çalışmada, 1,6 mm kalınlığında bazalt elyaf takviyeli polimer malzemenin geometrik olarak doğru lazer kesim sağlayabilen optimum kesme parametreleri düzeylerini belirlemeyi amaçlamıştır. Deney tasarımı yanıt yüzey yöntemi Box-Behnken tasarımı ile yapılmıştır. Lazer kesme parametresi olarak ışık akımı, darbe genişliği, darbe frekansı, basınç ve kesme hızı kullanılmıştır. Kerf genişliği, kerf sapması ve kerf konikliği için ikinci dereceden matematiksel modelleri başarılı bir şekilde geliştirilmiş ve farklı kerf kalitesi karakteristiklerinin tahmini için yeterli güven seviyesinde bulunmuştur. ANOVA analizinde ışık akımı, kerf genişliği ve kerf konikliği için en önemli bir faktör iken kesim hızı kerf sapması için en önemli faktör olarak belirlenmiştir. Tüm deneylerde daha düşük basınç ve kesme hızlarında minimum kerf oranını bulmuştur [11]. Karthikeyan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, yumuşak çeliklerin lazerle kesilmesinde kerf genişliğini ve kerf oranını en aza indirmeye çalışılmıştır. Lazer işleme deneyleri için parametrelerinin tasarımında Box-Behnken yöntemi kullanmışlardır. Deney parametresi olarak kesme hızı, güç ve basınç dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler gri ilişkisel analizinde uygulanmış ve her bir parametrenin anlamlı katkısını bulmak ve minimum kerf kalitesi için optimum parametreleri tahmin etmek için gri ilişkisel dereceleri hesaplanmıştır. Sonuçlardan, gücün diğer faktörlere göre en önemli faktör olduğu ve optimum durumun 1 kW güç, 1,3 m/dak kesme hızı ve 0,15 bar basınç olduğu tespit edilmiştir. Kerf oranı tüm deneyler için daha düşük basınç ve kesme hızlarında minimum kerf oranına ulaşmıştır [12].

Yapılan literatür araştırmasında, lazer ile kesme işlemlerinde kullanılan parametrelerin parça kalitesi üzerine etkisi ile ilgili çalışmaların devam ettiği görülmüştür. Bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki St-37 malzemenin lazerle

kesme işlenmesinde frekans, basınç ve kesme hızı gibi seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ve kerf genişliğine olan etkileri deneysel ve istatistiksel olarak incelenmiştir.

## 2. Deneysel Metot

Deneylerde, inşaat ve iş makinalarının, kara ve demir yolu araçlarının, konteynırların, basınçlı kapların, LPG tanklarının imalatında yaygın olarak kullanılan St-37 sac malzeme kullanılmıştır. Dumet Demir, Metal SAN. TİC. LTD. ŞTİ. firmadan temin edilen St-37 sac malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney numunelerinin kimyasal bileşimi (%).

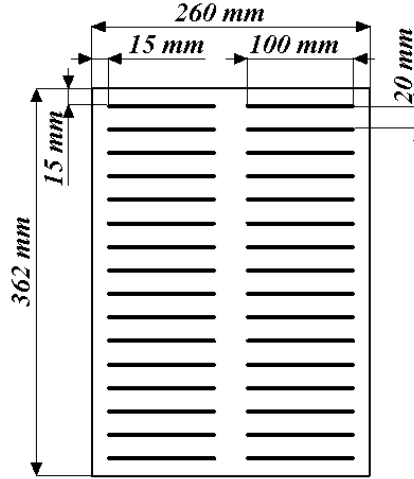
Malzeme	Element (%)						Fe
	C	Si	Mn	P	S	N	
St-37	0,17	0,40	0,50	0,05	0,06	0,007	Denge

Lazer işleme deneyleri 800 W gücü sahip SUNTOP ST-FC3015 marka üç eksenli CNC lazer kesim tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan lazer kesim tezgâhının teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Lazer kesimin uygulandığı tezgâhın teknik özellikleri.

Tezgâh Parametreleri	Değerler
Maksimum lazer gücü	800 W
Lazer dalga boyu	1064 nm
Etkili işleme alanı	1500x3000 mm
X, Y eksenli konumlandırma hassasiyeti	± 0,03 mm
X, Y maksimum aksinel ivmelenme	1 g
Tüketilen toplam güç	≤8 kW

Deneylerin gerçekleştirilmesi esnasında kesilen yüzeylerin incelenmesinde karışıklık olmaması için deney tasarımı CAD programında tasarlanış ve yerleşim planı yapılmıştır. Yerleşim planı yapılarak kesilecek numunelerin ölçüleri Şekil 1’de verilmiştir.



**Şekil 1.** Deneylerde kullanılacak numunenin ölçüleri ve yerleşim planı.

Deneyler sonucunda meydana gelen kerf genişliğinin ölçümlerinde Insize marka ISM-PM200SA dijital mikroskop kullanılmıştır. Kerf genişlikleri kesme boyunca dört farklı noktadan yapılarak ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Kesilen numunelerin yüzeylerinin pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surface SJ-210 model yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler her numunenin işlenmiş yüzeylerinin dört farklı noktasından alınan sonuçların aritmetik ortalaması hesaplanarak bulunmuştur.

### 3. Deneysel Tasarım

Mühendislik malzemelerinin lazerle işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğini doğrudan etkileyecek olan etkin işleme parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için Taguchi yöntemi, lazer işleme operasyonlarında işleme parametrelerinin belirlenmesinde deney parametrelerinin sayısını önemli derecede azaltmada ve uygun işleme koşullarının belirlenmesinde kullanılan bir yöntemdir [13-14]. Taguchi yöntemi geleneksel olarak hazırlanan deney parametrelerinin dikkate alınmadığı ve kontrol edilemeyen faktörlerin oluşturduğu değişkenlerin kontrolüne izin vermektedir. Kontrol faktörü seviyelerinin bu faktörlere karşı performans özelliklerini ölçmek için, Taguchi yöntemi amaç fonksiyon değerlerini bir sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürmektedir. S/N oranı, deneysel verilerin kalite özelliklerini gösteren istenmeyen rasgele gürültü değeri için istenen sinyal oranı olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca, ANOVA işleme parametrelerinin istatistiksel önemini ortaya çıkarmak için kullanılmaktadır. Böylelikle işleme parametrelerinin en iyi şartlarının belirlenmesi ANOVA ve S/N oranı yardımıyla hesaplanmaktadır [15-19].

Yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kerf genişliğinin belirlenmesi için kontrol faktörleri için verilen her bir deney kombinasyonu için deneyler yapıldı. Yapılan çalışmada S/N değerlerinin tespit edilmesinde ve işleme verimliliği için yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerinin en küçük olması istenildiği için Denklem (1)'de verilen "en küçük en iyi" prensibine karşılık gelen formül kullanılmaktadır[20]. Formülde,  $y_i^2$ , ölçüm sonuçlarının toplamının karesi, n ise toplam deney sayısıdır. Lazer işleme deneylerinde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3'de verilmektedir.

$$\text{En küçük en iyi: } \frac{S}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

**Tablo 3.** Lazer işleme deneyleri kontrol faktörleri ve seviyeleri.

Sembol	Kontrol Faktörleri	Seviye			
		1	2	3	4
A	Frekans (Hz)	2500	3500	-	-
B	Basınç (Bar)	0,8	0,9	1	1,1
C	Kesme Hızı (mm/s)	10	16	22	28

## 4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

### 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği

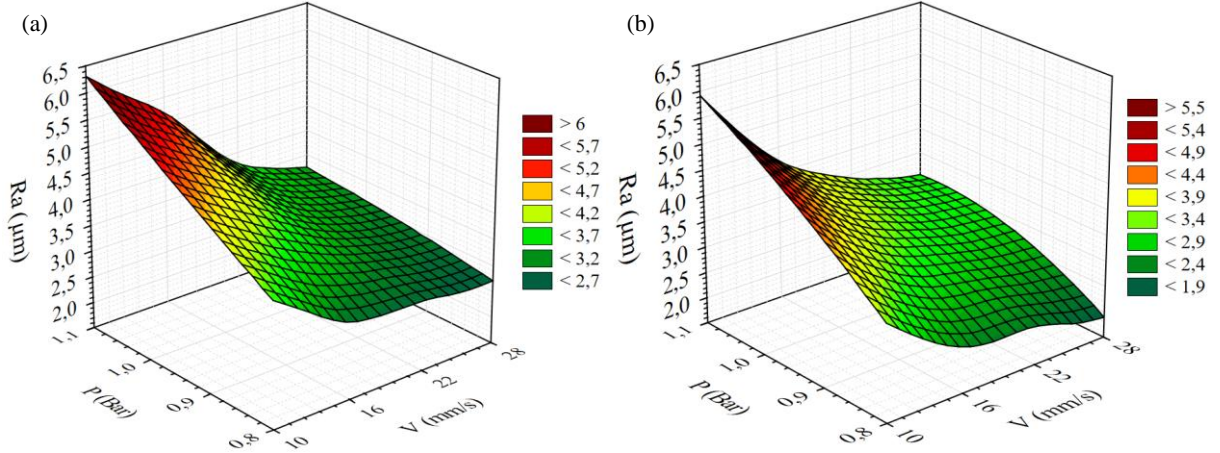
Yapılan çalışmada St-37 sac malzemesinin lazer işleme deneyleri için hazırlanan deney tasarımında yer alan her bir kombinasyon için deneyler yapılmış ve sonuçları Tablo 4'de verilmektedir. Deneyler sonucunda lazer işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine etkisi Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterilmektedir.

Şekil 2 (a) ve (b)'de lazer ile kesilen numunelerin kesme işlemi sonucunda kesme parametrelerine bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimleri sunulmaktadır. Şekil 2 (a) incelendiğinde, 2500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü 3,98  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. 10 mm/s kesme hızında gaz basıncının sırası ile 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar kadar artırılması ile yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile ortalama % 10,3 (4,39  $\mu\text{m}$ ), % 43,72 (5,72  $\mu\text{m}$ ) ve % 56,28 (6,22  $\mu\text{m}$ ) oranlarında artış olmaktadır. Kesme hızının 10 mm/s'den sonra düzenli olarak 28 mm/s kesme hızına kadar artırılması ile bütün gaz basıncı değerlerinde yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmanın olduğu görülmüştür. 28 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneyde 2,69  $\mu\text{m}$  ile en düşük yüzey pürüzlülük değerine ulaşılmıştır. 0,8 bar gaz basıncında ve 28 mm/s kesme hızında yapılan deneye göre 0,9 bar ve 1 bar gaz basıncında yapılan deneylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ortalama % 12,45 oranında ve 1,1 bar gaz basıncında yapılan deneyde % 21,2 (3,26  $\mu\text{m}$ ) oranında artış olduğu görülmektedir. 3500 Hz frekans değerlerinde kesme hızı ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 2 (b)'de verilmektedir. 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değeri 3,39  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Gaz basıncının 0,8 bar'dan 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar çıkarılması ile yüzey pürüzlülük değerleri sırası ile ortalama % 27,14 (4,31  $\mu\text{m}$ ), % 53,68 (5,21  $\mu\text{m}$ ) ve % 74,34 (5,91  $\mu\text{m}$ ) oranlarında artış olduğu belirlenmiştir. Kesme hızının 28 mm/s kadar artırılması ile 0,8 bar gaz basıncında 1,86  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülük değeri ile en düşük pürüzlülük değeri ölçülmüştür. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 0,9 bar, 1 bar ve 1,1 bar kadar artırılması ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülük değeri 0,8 bar gaz basıncına göre sırası ile % 43, % 55,38 ve % 64,5 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2 (a) ve (b) incelendiğinde gaz basıncının azaltılması, frekans değerlerinin ve kesme hızının artırılması ile yapılan

deneylerde yüzey pürüzlüğünün azaldığı görülmüştür. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlarla literatürde yapılan çalışmaların sonuçları paralellik göstermektedir [21-23].

**Tablo 4.** Lazer kesme deneylerin sonuçları.

Kontrol Faktörleri						Kontrol Faktörleri					
Deney No	A			Ra ( $\mu\text{m}$ )	KG (mm)	Deney No	A			Ra ( $\mu\text{m}$ )	KG (mm)
	Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)				Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)		
1	2500	0,8	10	3,98	0,36	17	3500	0,8	10	3,39	0,37
2	2500	0,8	16	2,86	0,28	18	3500	0,8	16	2,39	0,33
3	2500	0,8	22	2,89	0,27	19	3500	0,8	22	2,26	0,29
4	2500	0,8	28	2,69	0,23	20	3500	0,8	28	1,86	0,26
5	2500	0,9	10	4,39	0,39	21	3500	0,9	10	4,31	0,41
6	2500	0,9	16	3,89	0,33	22	3500	0,9	16	3,20	0,35
7	2500	0,9	22	3,14	0,28	23	3500	0,9	22	2,90	0,36
8	2500	0,9	28	2,96	0,27	24	3500	0,9	28	2,66	0,29
9	2500	1,0	10	5,72	0,45	25	3500	1,0	10	5,21	0,48
10	2500	1,0	16	4,42	0,41	26	3500	1,0	16	3,86	0,36
11	2500	1,0	22	3,53	0,43	27	3500	1,0	22	3,09	0,37
12	2500	1,0	28	3,09	0,31	28	3500	1,0	28	2,89	0,33
13	2500	1,1	10	6,22	0,49	29	3500	1,1	10	5,91	0,52
14	2500	1,1	16	5,31	0,46	30	3500	1,1	16	4,21	0,47
15	2500	1,1	22	3,72	0,41	31	3500	1,1	22	3,44	0,46
16	2500	1,1	28	3,26	0,36	32	3500	1,1	28	3,06	0,38

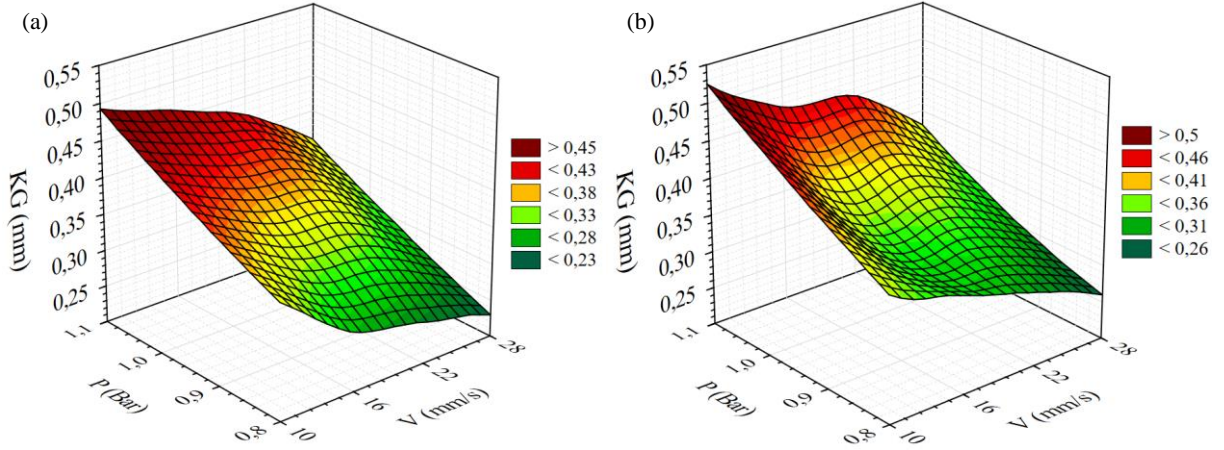


**Şekil 2.** St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlüğüne etkisi.

(a) 2500 Hz (b) 3500 Hz

Lazer kesme deneyleri iki farklı frekans değerinde, dört farklı kesme hızı ve dört farklı gaz basıncında gerçekleştirilmiş ve deneyler sonucu lazer kesme parametrelerinin kerf genişliğine etkisi Şekil 3 (a) ve (b)'de gösterilmektedir. Yapılan lazer deneyleri esnasında kesmenin başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar kerf genişliğinin ölçümünde ölçüm değerlerinin arttığı bu durumun ise kesme boyunca iş parçası üzerinde biriken ısının ve lazer ışığında meydana gelen sapmaların bir sonucu olarak oluştuğu düşünülmektedir [23-24]. Şekil 3 (a)'da 2500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında kerf genişliği 0,36 mm ölçülmüştür. Gaz basıncının 1,1 bar çıkarılması ile kerf genişliği % 36,1 oranında artarak 0,49 mm olmuştur. 0,8 bar gaz basıncında kesme hızının 10 mm/s'den düzenli olarak artırılarak 28 mm/s çıkarılmasıyla 0,23 mm ile en düşük kerf genişliği ölçülmüştür. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 1,1 bar çıkarılmasıyla kerf genişliği artmış ve 0,29 mm ölçülmüştür. Şekil 3 (b)'de incelendiğinde, 3500 Hz frekans değerinde 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan lazer kesme deneylerinde kerf genişliği 0,37 mm ölçülmüştür. 10 mm/s kesme hızında ve 0,8 bar gaz basıncında yapılan lazer kesme deneyleri sonrası gaz basıncının düzenli olarak 1,1 bar kadar

artırılmasıyla kerf genişliği % 40,54 ( 0,52 mm) artma görülmüştür. 0,8 bar gaz basıncında ve 10 mm/s kesme hızında yapılan deney sonrası gaz basıncının sabit kalması ile kesme hızının 28 mm/s'ye çıkarılması ile kerf genişliği 0,26 mm olmuştur. 28 mm/s kesme hızında gaz basıncının 1,1 bar'a çıkartılması ile kerf genişliği 0,38 mm ölçülmüştür. Kesme hızının azalması ve gaz basıncının artması ile kerf genişliğinin arttığı gözlenmiştir. Gaz basıncının artması ile kesme bölgesinden daha fazla ergimiş malzeme uzaklaştırılmaktadır. Ayrıca düşük kesme hızlarında birim zamandaki lazer ışınının kesme bölgesindeki etki süresi artacağından oluşan ısı kesme bölgesinde yoğunlaşacak ve daha fazla miktarda malzeme ergiteceğinden kerf genişliğini artıracaktır [24-25].



Şekil 3. St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin kerf genişliğine etkisi.  
(a) 2500 Hz (b) 3500 Hz

#### 4.2 Sinyal/gürültü analizi (S/N)

Deney tasarımındaki deneyler yapılarak kontrol faktörleri ile yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği sonuçlarının etkileşimleri incelenmiştir. Kontrol faktörlerinin optimizasyonunda sinyal/gürültü (S/N) analizi kullanılmıştır. Lazer kesme sonrası düşük yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri, ürünün kalitesini artırmak ve üretim maliyetinin azaltmak için çok önemlidir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için sinyal/gürültü (S/N) analizi yanıt tablosu Tablo 6'de verilmiştir. Lazer kesme deneyleri sonucunda, yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerlerinin ortalamaları sırası ile 3,64  $\mu$ m ve 0,36 mm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri için ortalama sinyal / gürültü (S/N) değerleri sırası ile -10,88 dB ve 8,87 dB olarak hesaplanmıştır.

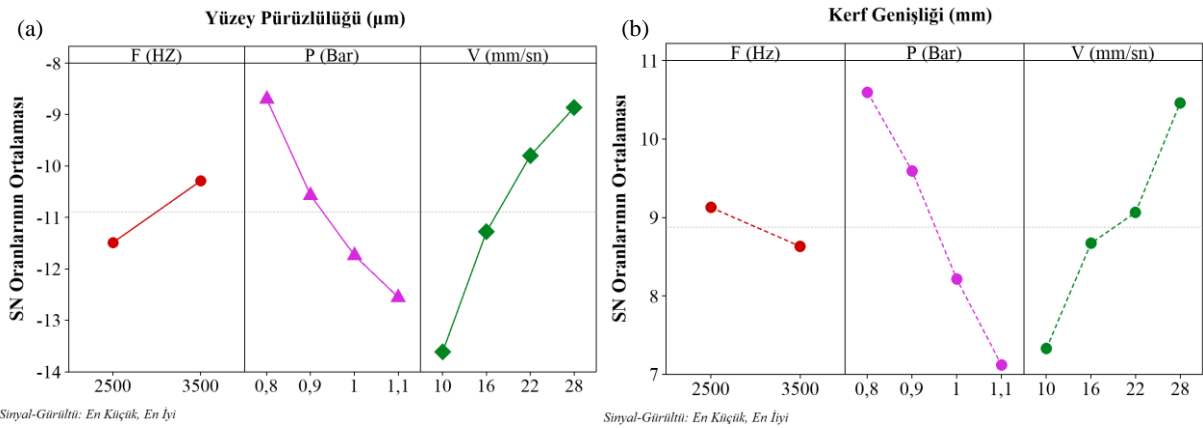
S/N yanıt tablosu kullanılarak her bir kontrol faktörünün yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkilerinin analizleri yapılmıştır. Tablo 5'da yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için S/N tahminleri sunulmuştur. Taguchi yöntemi ile en iyi yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği değerleri için en iyi kesme parametreleri düzeylerini göstermektedir. Buna göre en iyi yüzey pürüzlülüğü için kesme parametreleri A (seviye 2, S/N=-10,289), B (seviye 1, S/N=-8,698) ve C (seviye 4, S/N=-8,863) olmuştur. Buna göre 3500 Hz frekans, 0,8 basınç ve 28 mm/s kesme hızında en iyi kesme parametrelerinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1,86  $\mu$ m olmuştur. Benzer şekilde, en iyi kerf genişliği için kesme parametreleri A (seviye 1, S/N=9,128), B (seviye 1, S/N=10,598) ve C (seviye 4, S/N=10,459) olmuştur. Buna göre 2500 Hz frekans, 0,8 basınç ve 28 mm/s kesme hızında en iyi kesme parametrelerinde en iyi kerf genişliği 0,23 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 4'de lazer kesme işleminde kesme parametrelerinin S/N oranları görülmektedir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için S/N yanıt tablosu.

Seviye	Yüzey Pürüzlülüğü			Seviye	Kerf Genişliği		
	Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)		Frekans (Hz)	Basınç (Bar)	Kesme Hızı (mm/s)
1	-11,488	<b>-8,698</b>	-13,617	1	<b>9,128</b>	<b>10,598</b>	7,327
2	<b>-10,289</b>	-10,569	-11,278	2	8,632	9,591	8,670
3	-11,737	-9,798	-9,798	3		8,212	9,064
4		-12,552	<b>-8,863</b>	4		7,118	<b>10,459</b>
Delta	1,199	3,854	4,754	Delta	0,496	3,480	3,131

**Tablo 6.** Lazer kesme deneylerinin sonuçları ve S/N oranları.

Deney No	Kontrol Faktörleri			Ra için S/N Oranı (dB)	KG için S/N Oranı (dB)	Tahmini Ra ( $\mu\text{m}$ )	Tahmini Kerf Genişliği (mm)
	A Frekans (Hz)	B Basınç (Bar)	C Kesme Hızı (mm/s)				
1	2500	0,8	10	-11,9977	8,8739	3,9540	0,3493
2	2500	0,8	16	-9,1273	11,0568	3,0603	0,2968
3	2500	0,8	22	-9,2180	11,3727	2,8565	0,2643
4	2500	0,8	28	-8,5950	12,7654	2,5490	0,2293
5	2500	0,9	10	-12,8493	8,1787	4,4678	0,3806
6	2500	0,9	16	-11,7990	9,6297	3,8290	0,3281
7	2500	0,9	22	-9,9386	11,0568	3,1503	0,3006
8	2500	0,9	28	-9,4258	11,3727	2,9328	0,2607
9	2500	1,0	10	-15,1479	6,9357	5,6328	0,4706
10	2500	1,0	16	-12,9084	7,7443	4,4740	0,3981
11	2500	1,0	22	-10,9555	7,3306	3,4903	0,4056
12	2500	1,0	28	-9,7992	10,1728	3,1628	0,3256
13	2500	1,1	10	-15,8758	6,1961	6,2553	0,4893
14	2500	1,1	16	-14,5019	6,7448	5,1165	0,4568
15	2500	1,1	22	-11,4109	7,7443	3,7828	0,4193
16	2500	1,1	28	-10,2644	8,8739	3,3553	0,3543
17	3500	0,8	10	-10,6040	8,6360	3,4159	0,3806
18	3500	0,8	16	-7,5680	9,6297	2,1896	0,3131
19	3500	0,8	22	-7,0822	10,7520	2,2934	0,2956
20	3500	0,8	28	-5,3903	11,7005	2,0009	0,2606
21	3500	0,9	10	-12,6895	7,7443	4,2321	0,4193
22	3500	0,9	16	-10,1030	9,1186	3,2609	0,3518
23	3500	0,9	22	-9,2480	8,8739	2,8896	0,3393
24	3500	0,9	28	-8,4976	10,7520	2,6871	0,2993
25	3500	1,0	10	-14,3368	6,3752	5,2971	0,4593
26	3500	1,0	16	-11,7317	8,8739	3,8059	0,3718
27	3500	1,0	22	-9,7992	8,6360	3,1296	0,3943
28	3500	1,0	28	-9,2180	9,6297	2,8171	0,3143
29	3500	1,1	10	-15,4317	5,6799	5,8746	0,5206
30	3500	1,1	16	-12,4856	6,5580	4,4034	0,4731
31	3500	1,1	22	-10,7312	6,7448	3,3771	0,4506
32	3500	1,1	28	-9,7144	8,4043	2,9646	0,3856

**Şekil 4.** St 37 sac malzemenin lazer kesme işleminde kontrol faktörlerinin, (a) yüzey pürüzlülüğü ve (b) kerf genişliğine etkisi.

### 4.3. Varyans analizi (ANOVA)

Lazer kesme deneylerinde kullanılan kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine katkısını değerlendirmek için varyans analizi (ANOVA) yöntemi kullanılmış ve sonuçları Tablo 7’de sunulmuştur. Varyans analizi % 95 güven ve %5 anlamlılık düzeyinde yapılmıştır. P değeri 0,05’den küçük değerler için anlamlı olduğunu gösterir, eğer P değeri 0,05’den büyükse deneylerde kullanılan parametrelerin bir etkisi olmadığı düşünülür [26]. Burada, her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki anlamlılık düzeyin gösteren P değerleri ile toplam serbestlik derecesi (DF), ardışık kareler toplamı (Seq SS), düzeltilmiş kareler toplamı (Adj SS), ayarlanmış ortalama kareler (Adj MS), F değerleri ve yüzde katkı oranları görülmektedir. ANOVA yönteminde kontrol faktörlerinin çıktı üzerine en fazla etki edeni belirlemek için F değeri en büyük olan dikkate alınır [15]. Tablo 7’de, lazer kesme işlemlerinde kontrol faktörleri için yapılan varyans analizi sonucu frekansın, basıncın ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerine yüzde katkı oranları sırası ile % 55,78, % 31,68 ve % 4,73 olmuştur. Ayrıca frekansın, basıncın ve kesme hızının kerf genişliği sonuçları üzerine yüzde katkı oranları sırası ile % 1,56, % 54,26 ve % 38,04 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre lazer kesme işleminde frekansın yüzey pürüzlülüğü üzerine % 55,78 ve basıncın kerf genişliği üzerine % 54,26 ile en etkin parametreler olduğu belirlenmiştir.

**Tablo 7.** Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için varyans analiz sonuçları.

Yüzey Pürüzlülüğü							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
<b>Frekans (Hz)</b>	<b>3</b>	<b>20,334</b>	<b>55,78%</b>	<b>20,334</b>	<b>6,7780</b>	<b>57,17</b>	<b>0,000000000444</b>
Basınç (Bar)	3	11,546	31,68%	11,546	3,8488	32,46	0,0000000129942
Kesme Hızı (mm/s)	1	1,725	4,73%	1,725	1,7252	14,55	0,0008406392853
Hata	24	2,845	7,81%	2,845	0,1186		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>36,451</b>	<b>100,00%</b>				
R-sq 92,19%							
Kerf Genişliği							
Kaynak	DF	Seq SS	Katkı (%)	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Frekans (Hz)	1	0,002812	1,56%	0,002812	0,002812	6,10	0,0210006572239
<b>Basınç (Bar)</b>	<b>3</b>	<b>0,097775</b>	<b>54,26%</b>	<b>0,097775</b>	<b>0,032592</b>	<b>70,71</b>	<b>0,000000000046</b>
Kesme Hızı (mm/s)	3	0,068550	38,04%	0,068550	0,022850	49,57	0,0000000001949
Hata	24	0,011062	6,14%	0,011062	0,000461		
<b>Toplam</b>	<b>31</b>	<b>0,180200</b>	<b>100,00%</b>				
R-sq 93,86%							

### 4.4. Regresyon Analizi

Regresyon analiz, bağımlı değişken ile bağımsız bir veya daha fazla değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak hesaplanması için kullanılan istatistiksel bir analiz yöntemidir [27]. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğinin belirlenmesi için lineer regresyon analizi kullanılmıştır. Şekil 5’de, deneysel ve doğrusal regresyon sonuçlarının karşılaştırılması gösterilmektedir. Lazer kesme işleminde bağımsız değişkenler olarak frekans (F), basınç (P) ve kesme hızı (V), bağımlı değişkenler ise yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için tahmini lineer regresyon denklemi sırası ile denklem (2) ve (3)’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için doğrusal denklemden elde edilen R<sup>2</sup> % 88,28 ve kerf genişliği için R<sup>2</sup> % 91,81 olarak hesaplanmıştır.

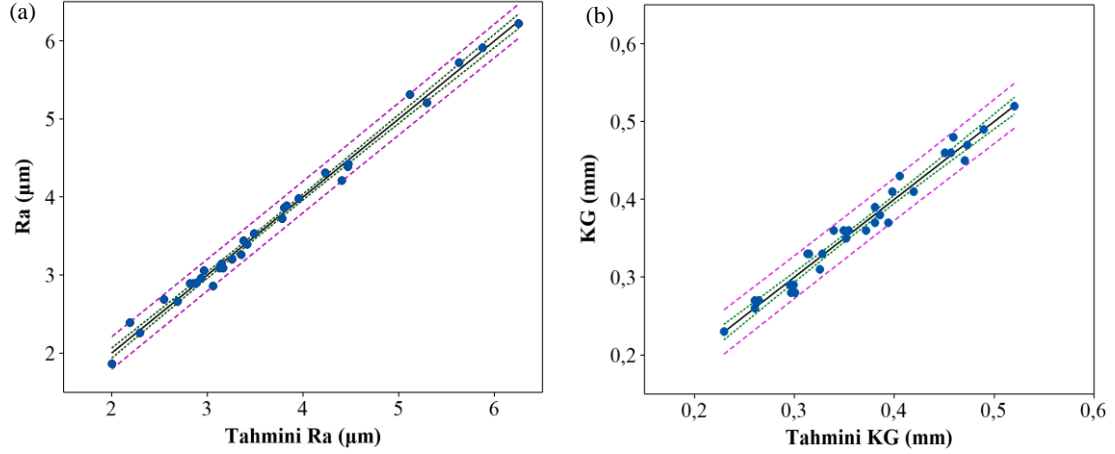
$$Ra (\mu m) = 2,142 - 0,000464 F + 0,5349 P - 0,1149 V \quad (2)$$

$$KG (mm) = -0,0284 + 0,000019 F + 0,04925 P - 0,006750 V \quad (3)$$

Doğrulama testleri Taguchi ve lineer regresyon analizleri ile optimum ve rasgele seçilen lazer kesme parametreleri ile yapılmıştır. Doğrulama test sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü için Taguchi metodu ile yapılan doğrulama testlerinde optimum (A2B1C4) ve rasgele seçilen (A1B1C2) parametreleri için hata oranı sırası ile %7,52 ve %6,99 olmuştur. Aynı değerlerde yapılan lineer regresyon testinde optimum değerler için hata oranı %15,05 ve rasgele seçilen parametreleri için hata oranı %19,58 olarak hesaplanmıştır. Kerf genişliği için Taguchi metodu ile yapılan doğrulama testlerinde optimum (A1B1C4) ve rasgele (A1B1C2) seçilen parametreler için hata oranları sırası ile %0,43 ve %3,57 olmuştur. Aynı değerlerde yapılan lineer regresyon



testinde optimum ve rasgele seçilen parametreler için hata oranları sırası ile %4,34 ve %3,57 olarak hesaplanmıştır. Yapılan test sonuçlarında hata oranları % 20'nin altında olması sonuçların kabul edilebilir değerler arasında olduğunu göstermektedir. Benzer çalışmalarda [28], istatistiksel hatanın %20'den az olması gerektiği vurgulanmıştır.



Şekil 5. Lazer kesme deneyleri sonucu lineer regresyon sonuçlarının, (a) Yüzey pürüzlülüğü, (b) Kerf genişliği karşılaştırılması.

Tablo 8. Doğrulama test sonuçları.

Seviye	Taguchi Metot			Lineer Regresyon Denklemi		
	Deney	Tahmini	% Hata	Deney	Tahmini	% Hata
<b>Ra</b>						
A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	1,86	2,00	7,52	1,86	1,58	15,05
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	2,86	3,06	6,99	2,86	3,42	19,58
<b>KG</b>						
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>4</sub>	0,23	0,229	0,43	0,23	0,22	4,34
A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	0,28	0,29	3,57	0,28	0,29	3,57

## 5. Sonuçlar

St-37 levha numunelerinin lazer ile kesilmesinde en uygun parametreler yüzey pürüzlülüğüne (Ra) ve kerf genişliğine (kW) göre Taguchi yöntemi ile belirlendi. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- ✓ Lazer kesme deneylerinde optimum çalışma parametresi olarak yüzey pürüzlülüğü için 3500 Hz frekans, 0,8 bar basınç ve 28 mm/s kesme hızı (A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) ve kerf genişliği için 2500 Hz frekans, 0,8 bar basınç ve 28 mm/s kesme hızı (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) olarak tespit edilmiştir.
- ✓ En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 2500 Hz ve 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) sırası ile 2,69 µm ve 1,86 µm olarak ölçülmüştür.
- ✓ En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 2500 Hz ve 3500 Hz, 1,1 bar ve 10 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>) sırası ile 6,22 µm ve 5,91 µm olmuştur.
- ✓ En düşük kerf genişliği ise 2500 Hz ve 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) sırası ile 0,23 mm ve 0,26 mm olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ En yüksek kerf genişliği değeri 2500 ve 3500 Hz, 1,1 bar ve 10 mm/s seviyelerinde (A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>B<sub>4</sub>C<sub>1</sub>) sırası ile 0,49 ve 0,52 mm olmuştur.
- ✓ Sinyal/gürültü (S/N) yanıt tabloları incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerleri için en etkili lazer işleme parametresinin 3500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s (A<sub>2</sub>B<sub>1</sub>C<sub>4</sub>) ve kerf genişliği için 2500 Hz, 0,8 bar ve 28 mm/s olarak belirlenmiştir.
- ✓ Varyans analizi sonucu yüzey pürüzlülüğü için % 55,78 ile frekans ve kerf genişliği için % 54,26 basınç etkili parametre olmuştur.

- ✓ Yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için hesaplanan tahmini değerler sırası ile 2,0009  $\mu\text{m}$  ve 0,2606 mm olmuştur.
- ✓ Lineer regresyon denklemleri ile yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için elde edilen R2 sırası ile % 88,28 ve % 91,81 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Yapılan çalışmada kullanılan St-37 sac malzemesinin lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü üzerine frekansın ve kerf genişliği üzerine basıncın etkisinin daha fazla olduğu görülmüştür. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda lazer kesme parametrelerinin daha geniş aralıklarda tutularak yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerine etkileri tekrar incelenebilir. Ayrıca odak noktası, nozul çapı ve nozulun yüksekliği gibi lazer kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğini doğrudan etkileyen diğer parametrelerde incelenmelidir.

### Kaynaklar

- [1] Chen MF, Ho YS, Hsiao WT, Wu TH, Tseng SH, Huang KC. Optimized laser cutting on light guide plates using grey relational analysis. *Opt. Lasers Eng* 2011; 49(2), 222-228.
- [2] Yang CB, Deng CS, Chiang HL. Combining the Taguchi method with artificial neural network to construct a prediction model of a CO2 laser cutting experiment. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2012; 59, 1103-1111.
- [3] Madić M, Radovanović M. Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO2 laser cutting of mild steel. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2013; 35, 103-110.
- [4] Arif AFM, Yilbas BS. Thermal stress developed during laser cutting process: consideration of different materials. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2008; 37, 698-704.
- [5] Nyon K, Nyeoh CY, Mokhtar M, Rahman RA. Finite element analysis of laser inert gas cutting on Inconel 718. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2012; 60, 995-1007.
- [6] Wandera C. Laser cutting of austenitic stainless steel with a high quality laser beam. M.S. Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2006; 127-128.
- [7] Sharma A, Yadava V. Modelling and optimization of cut quality during pulsed Nd:YAG laser cutting of thin Al-alloy sheet for straight profile. *Opt. Laser Technol.* 2012; 44 (1), 159-168.
- [8] Thawari G, Sarin Sundar JK, Sundararajan G, Joshi SV. Influence of process parameters during pulsed Nd:YAG laser cutting of nickel-base superalloys. *J. Mater. Process. Technol.* 2005; 170, 229-239.
- [9] Çaydaş U, Haşçalık A. Use of the grey relational analysis to determine optimum laser cutting parameters with multi-performance characteristics. *Opt. Laser Technol.*, 2008; 40, 987-994.
- [10] Pandey AK, Dubey A. Modeling and optimization of kerf taper and surface roughness in laser cutting of titanium alloy sheet. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2013; 27 (7), 2115-2124.
- [11] Gautam GD, Mishra DR. Firefly algorithm based optimization of kerf quality characteristics in pulsed Nd:YAG laser cutting of basalt fiber reinforced composite. *Composites Part B: Engineering*, 2019; 179 (1), 1-15.
- [12] Karthikeyan R, Senthilkumar V, Thilak M, Nagadeepan A. Application of grey relational analysis for optimization of kerf quality during CO2 laser cutting of Mild Steel. *Materials Today: Proceedings*, 2018; 5(9), 19209-19215.
- [13] Akgün M, Yurtkuran H, Ulaş HB. AA7075 alaşımının işlenebilirliğine suni yaşlandırmanın etkisinin analizi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2020; 26(1), 75-81.
- [14] Özlü B, Akgün M, Demir H. AA6061 Alaşımının tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin analizi ve optimizasyonu. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2019; 5(2), 151-158.
- [15] Yaka H. Tornalama Sonrası Çıkan Talaşlardan Elde Edilen Alüminyum 5000 Alaşımının Yüzey Pürüzlülüğünün Taguchi Yöntemi ile Analizi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2021; 11(1), 464-473.
- [16] Nas E, Akıncioğlu S. Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2019; 7(1), 115-126.
- [17] Özay Ç, Ballıkaya H, Altuğ M, Savaş V, Sağlam M, Teğetsel Silindirik Taşlama Yönteminde İşleme Parametrelerinin Titreşim Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 2018; 30(1), 311-317.
- [18] Gür AK, Yıldız T, İcen B. Theoretical evaluation of abrasive wear behavior of B4C/FeCrC coating layer evaluated by a Taguchi approach. *Materials Testing*, 2020; 62(7), 733-738.
- [19] Altuğ M, Erdem M, Özay Ç. Experimental investigation of kerf of Ti6Al4V exposed to different heat treatment processes in WEDM and optimization of parameters using genetic algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015; 78, 1573-1583.
- [20] Akkuş H, Yaka H. Experimental and Statistical Investigation of the Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness, Vibration and Energy Consumption in Machining of Titanium 6Al-4V ELI (Grade 5) Alloy. *Measurement*, 2021; 1, 1-9.
- [21] Pandey AK, Dubey AK. Simultaneous optimization of multiple quality characteristics in laser cutting of titanium alloy sheet. *Optics & Laser Technology*, 2012; 44(6), 1858-1865.
- [22] Ghany KA, Newishy M. Cutting of 1.2 mm thick austenitic stainless steel sheet using pulsed and CW Nd:YAG laser. *J. Mater. Process. Technol.*, 2005; 168, 438-447.
- [23] Rajaram N, Sheikh-Ahmad J, Cheraghi SH. CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003; 43, 351-358.
- [24] Ayı M, Yücelişli F. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiber Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Kesim Kalitesine Etkisinin Araştırılması. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, 2018; 30(2), 215-223.

- [25] Yilbas BS. Laser cutting quality assessment and thermal efficiency analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004; 155, 2106-2115.
- [26] Akkuş H, Yaka H. Optimization of Turning Process By Using Taguchi Method. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2018; 22(5), 1444-1448.
- [27] Kıvak T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 2014; 50, 19-28.
- [28] Nas E, Öztürk B. Optimization of surface roughness via the Taguchi method and investigation of energy consumption when milling spheroidal graphite cast iron materials. *Mater. Test.*, 2018; 60, 519-525.