

PASLANMAZ ÇELİK MALZEMELERİN FİBER LAZER KESİMİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Celalettin YÜCE *

Alınma: 17.01.2019 ; düzeltme: 17.05.2019 ; kabul: 10.07.2019

Öz: Günümüzde lazer ışını ile kesme yöntemi modern malzeme kesme yöntemleri arasında maliyet ve kalite açısından üstün özellikleri nedeni ile öne çıkmaktadır. Özellikle lazer kesme yöntemi, imalat sektöründeki birçok uygulamada kullanılan paslanmaz çeliklerin kesilmesinde çok önemli avantajlara sahiptir. Bu çalışma kapsamında 304 kalite paslanmaz çelik malzemenin fiber lazer ile kesilmesinde lazer gücü, kesme hızı ve odak mesafesinin kesilen yüzeylerin pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Box-Behnken deney tasarımına göre parametre çiftleri belirlenerek kesme işlemi gerçekleştirilmiş ve yüzey pürüzlülükleri ile kerf genişlikleri ölçülmüştür. İşlem parametrelerinin tekil ve etkileşimli etkilerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Yüzey pürüzlülükleri ve kerf genişlikleri için cevap yüzeyi fonksiyonları belirlenmiş ve istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ile optimum proses parametreleri tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki en etkili parametrenin odak mesafesi olduğu, ilerleme hızının etkisinin sınırlı kaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Lazer Kesme, Paslanmaz Çelik, Parametre Optimizasyonu

Optimization of Process Parameters in Fiber Laser Cutting of Stainless Steel Material

Abstract: Nowadays laser cutting is one of the most important method of modern material cutting due to its superior features in terms of cost and quality. Particularly, the laser cutting method has very important advantages in the cutting of stainless steels used in many applications in the manufacturing sector. In this study, the effects of laser power, cutting speed and focal length on the roughness of cut surfaces and kerf width were investigated. According to the Box-Behnken experiment design, parameter pairs were determined and surface roughness and kerf widths were measured. Variance analysis (ANOVA) was applied to determine the single and interactive effects of the process parameters. Response surface functions have been determined for surface roughness and kerf widths and optimum process parameters have been determined with desirable function approach. As a result of the study, it was found that the most effective parameter on surface roughness and kerf width was focal distance and the effect of progression speed was limited.

Keywords: Laser Cutting, Stainless Steel, Parameter Optimization

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji neticesinde imalat sanayisinde kullanılan ürünlerin farklı malzeme türlerinden yüksek boyutsal doğruluk, düşük işleme toleransları ve uygun maliyetler ile işlenmesi öncelikli hedef haline gelmiştir. Lazer ile işleme yöntemi geleneksel malzeme işleme yöntemleri arasında işlem kalitesi ve maliyetleri açısından bu doğrultuda öne çıkmaktadır. Kesilmesi zor olan kırılgan ve yumuşak malzemeleri temassız işleme özelliği ile

* Bursa Teknik Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Yıldırım 16039 Bursa.
İletişim Yazarı: Celalettin Yüce (celalettin.yuce@btu.edu.tr)

hızlı ve yüksek hassasiyette işleyebilmesi, çok küçük bir alana odaklanabilen ışını sayesinde dar bir ısı etkisi altında kalan alan oluşturmaması ve malzeme kaybını minimuma indirmesi lazer ile işleme yönteminin en önemli avantajlarıdır (Yilbas ve diğ., 2017). Lazer ile kesme işlemi lazer ışınının kesilecek metal yüzeyin kesim bölgesine odaklanması ile gerçekleştirilir. Odaklanan ışının ortaya çıkardığı ısı ile malzemede buharlaşma meydana gelir ve delik oluşur. Sonrasında hareket eden lazer ışını ile malzeme ergitilir ve yardımcı gaz ile parçadan uzaklaştırılır. Metal malzemelerin kesilmesinde yardımcı gaz olarak hava, oksijen (O₂) veya nitrojen (N₂) kullanılır. Kullanılan basınçlı yardımcı gaz kesim bölgesini soğutarak aşırı ısınmayı önler ve kesme işlemi esnasında ortaya çıkan cürufu da bölgeden uzaklaştırır (Çavdar ve Tanrısever, 2013).

Lazer kesme işlemi için en yaygın kullanılan lazer türleri Nd:YAG, karbondioksit (CO₂) ve fiber lazerlerdir. Fiber lazerler yaygınlaşmadan önce kalın malzemelerin kesilmesinde CO₂ lazerler daha avantajlı iken, ince ve hassas kesim gerektiren malzemelerde Nd:YAG lazerler kullanım alanı bulmaktaydı. Ancak, 1060-1080 µm dalga boylarında çalışan yüksek güç, yüksek ışın kalitesi ve verimliliği ile günümüzde fiber lazerler endüstride diğer lazer türlerine göre daha fazla yer almaya başlamıştır (Wandera ve Kujanpää, 2011). Fiber lazerler üstün özellikleri sayesinde daha derin etki oluşturmaya, uzun odaklı lenslerin kullanımına, optik lenslerin daha az hasar görmesine ve uzak mesafeli uygulamalara izin vermektedir. Üretilen lazer ışını, kesme kafasında aynaya gerek kalmadan esnek fiber optik kablo ile iletildiği için güç kaybı olmamaktadır. Fiber optik kablolarda güç kaybı olmamakta dolayısıyla ilave olarak soğutma sistemine gerek kalmamaktadır. Fiber lazerlerin enerji verimlilikleri de oldukça yüksektir. Aynı kalınlıktaki çelik malzemeyi belirli bir hızda kesmek için gereken güç fiber lazerde çok daha düşüktür (Wandera vd., 2011).

Lazer kesme işleminin kalitesi kesilen yüzeyin geometrisi, pürüzlülüğü, morfolojisi ve metalürjik özellikleri incelenerek belirlenmektedir. Bu kalite karakteristiklerinin istenilen düzeyde olması ise kesilecek malzeme özelliklerine uygun olarak seçilen işlem parametrelerine bağlıdır. Yapılan araştırmalarda lazer gücü, lazer modu, ilerleme hızı, odak mesafesi, yardımcı gaz türü ve basıncının kesme kalitesi üzerindeki en etkili parametreler olduğu görülmüştür (Dubey ve Yadava, 2008). Birçok araştırmacı bu parametrelerin kesme kalitesi üzerine etkilerini incelemiş ve farklı deneysel tasarım metotları yardımı ile optimize etmişlerdir (Rana vd., 2018). Kotadiya vd. (2018) cevap yüzeyi metodu kullanarak lazer gücü, kesme hızı ve yardımcı gaz basıncının kesilen malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve kesim izi (kerf) genişliğine olan etkisini incelemiş ve en etkili parametrenin lazer gücü olduğunu belirlemişlerdir. Parthiban vd. (2018) ve Karthiken vd. (2018) ise en iyi kesme kalitesini elde etmek için optimum proses parametrelerini araştırmışlardır.

İmalat sektörünün farklı alanlarında, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren birçok uygulamada kullanılan paslanmaz çelikler bileşimlerinde yüksek oranda krom içerdikleri için oksijen ile kesme yöntemlerine uygun değildir (Kotadiya ve Pandya, 2016). Lazer ışını, üstün özellikleri sayesinde bu malzeme türünün kesiminde ön plana çıkmaktadır. Literatürde araştırmacılar paslanmaz çeliklerin CO₂ ve fiber lazer ile kesilmesinde yüzey kalitesini ve işlemin verimliliğini incelemişlerdir. Stelzer vd. (2013) 10 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemenin fiber lazer ve CO₂ lazer ile kesilmesinde yüzey kalitesini incelemişler ve fiber lazerlerin CO₂ lazerlere göre çok daha iyi sonuçlar verdiğini açıklamışlardır. Fomin vd. (2015) ise paslanmaz çeliklerin kesiminde fiber lazerlerin N₂ yardımcı gaz atmosferinde CO₂ lazerlerine göre daha verimli olduğunu belirtmişlerdir.

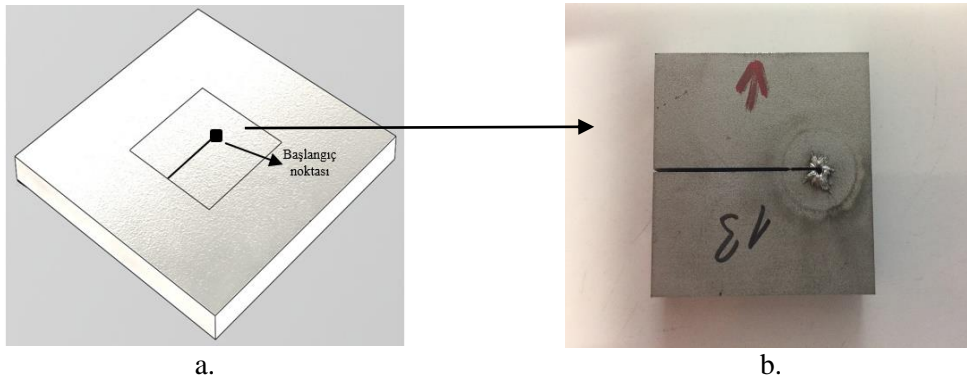
Literatürde paslanmaz çeliklerin lazer kesiminde işlem parametrelerinin kesme kalitesi deneysel olarak incelenmiştir. Wandera vd. (2009) yardımcı gaz basıncı ve lazer ışınının odak konumunun kesim yüzey kalitesine olan etkilerini incelemişler ve lazer ışınının odağının parça yüzeyinden içeriye taşındığında daha iyi bir yüzey kalitesi elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yardımcı gaz basıncının belirli bir seviyeye kadar artmasının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını da vurgulamışlardır (Wandera vd., 2009). Benzer bir sonuç Mullick vd. (2016) çalışmasında da görülmüş, en iyi yüzey kalitesi lazer odağının parçanın alt yüzeyinde olduğu durumda elde

edilmiştir. Wandera vd. (2011) ve Jarosz vd. (2016) ise kesme hızının azalması ile ısı etkisi altında kalan bölgenin genişlediğini ve aşırı ısı girdisi nedeni ile kesilen yüzeyde hasarların oluştuğunu açıklamışlardır. Durukan vd. (2014) farklı geometri ve kesme parametrelerinde kestikleri paslanmaz çeliklerin boyutsal doğruluklarını incelemişler ve boyutsal doğruluk üzerinde en etkili parametrenin lazer gücü olduğunu ilerleme hızı ve odak noktasının daha düşük seviyede etkilediği açıklamışlardır. Kotadiya ve Pandya (2016) ise yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin lazer gücü olduğunu göstermişlerdir.

Yapılan literatür araştırmasında nispeten kalın paslanmaz çeliklerin fiber lazer tezgahında kesilmesinde odak mesafesinin etkisini inceleyen ve parametre optimizasyonu gerçekleştiren çalışmaların sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu çalışmanın temel amacı paslanmaz çeliklerin lazer kesiminde en etkili proses parametreleri olan lazer gücü, kesme hızı ve odak noktasının kesim yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine olan etkisi Cevap Yüzeyi Metodu (Response Surface Methodology – RSM) yardımı ile incelenmesidir. Bu kapsamda proses parametrelerinin tekil ve etkileşimli etkileri varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir. İstenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ile yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğini minimuma indirmek için optimum proses parametreleri tespit edilmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında 8 mm kalınlığındaki 304 kalite paslanmaz çelik (SS-304) malzeme CNC kontrollü fiber lazer tezgahında kesilmiştir. Numuneler 100x100x8 mm boyutlarındaki tabakaların içinden 40x40x8 mm boyutlarında Şekil 1’de görülen geometride 17 adet numune kesilerek çıkarılmıştır. Lazer kesme tezgâhı olarak Durma marka 4 kW’lık HD-F 3015 tezgâh kullanılmıştır. Kesim esnasında 150 mm odak lensi ve sürekli modda (CW) lazer ışını kullanılmıştır. Tüm deneylerde yardımcı gaz olarak sabit 16 bar basınç ile N₂ gazı kullanılmıştır. Yapılan ön denemeler sonucunda işlem parametrelerinin sınırları belirlenmiş, sonrasında parametrelerin aralıkları seçilmiştir.



Şekil 1:

Kesilerek çıkarılan parçanın a. CAD görüntüsü ve b. kesilmiş bir örnek

Çalışma kapsamında işlem parametrelerinin (lazer gücü, kesme hızı, odak mesafesi) optimizasyonu için Cevap Yüzey Metodu (CYM) kullanılmıştır. CYM, bir ürünün veya sürecin kalite karakteristiklerinin istenen seviyede olmasını sağlayacak parametre değerlerini araştırmak için istatistiksel ve matematiksel teknikleri kullanan bir yöntemdir. Bu yöntemde seçilecek deneysel tasarıma uygun olarak yapılan deneylerden elde edilen veriler ile çok faktörlü modeller oluşturulur ve benzer çözümler üreten bir matematiksel model kurgulanır.

CYM yöntemin ilk aşamasında deneysel tasarım kullanılarak daha az sayıda deney ile daha verimli sonuçlar elde edilir. Sonraki aşamada elde edilen değerler ile işlem parametreleri arasındaki ilişki polinom ile ifade edilir. Son aşamada ise ANOVA (varyans analizi) ile proses parametrelerinin etkileri belirlenmiş ve istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı ile optimum proses

parametreleri tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında işlem parametreleri en düşük yüzey pürüzlülüğünü elde edecek şekilde optimize edilmiştir. Her bir parametrenin etkisini belirlemek için ANOVA yöntemi kullanılmıştır. Her bir cevap için ikinci derecede model denklemleri Eş. 1'e göre geliştirilmiştir. Bu eşitlikte Y bağımlı değişken (yüzey pürüzlülüğü), b_0 sabit terim, b_i lineer parametrelerin katsayıları ve x_i bağımsız değişkenleri (işlem parametreleri) ifade etmektedir.

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ii} x_{ii}^2 + \sum b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

İkinci derece cevap yüzeyi fonksiyonun parametrelerini tahmin edebilmek için en az 3 seviyeli deney tasarımlarının kullanılması gerekmektedir. Bu amaç ile Box-Behnken ve Merkezi Kompozit deney tasarımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında en az sayıda deneme ile sonuç alabilmek adına Box-Behnken deney tasarımı tercih edilmiştir. Design-Experts programı yardımı ile deney tasarımı oluşturulmuş ve çözümlenmeler yapılmıştır. Lazer gücü, kesme hızı ve odak mesafesi olmak üzere üç farklı işlem parametresi için 3 seviye Box-Behnken deneysel tasarım girdileri Tablo 1'de verilmiştir. Toplamda 5 merkez nokta ile 17 farklı deney yapılarak seçilen işlem parametre seviyelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine olan etkileri incelenmiştir. Odak mesafesi için seçilen negatif değerler lazer ışının parça yüzeyinden içeri doğru olan mesafesini tanımlamaktadır.

Tablo 1. Box-Behnken tasarımı için kesme işlem parametre seviyeleri

Parametre	Sembol	Birim	Seviye - 1	Seviye - 2	Seviye - 3
Lazer Gücü	LG	Watt	3750	4000	4250
Kesme Hızı	KH	mm/dak	1500	1600	1700
Odak Mesafesi	OM	mm	-3	-4	-5

Kesme işleminden sonra numunelerin kesilen yüzeyleri üzerinde Mitutoyo SJ-301 ölçüm cihazı ile aritmetik ortalama pürüzlülük (R_a) ve kuadratik ortalama pürüzlülük (R_q) değerleri kaydedilmiştir. R_a değeri yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y- koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. R_a ayrıca yüzey pürüzlülüğünün y-koordinatlarının merkez hattındaki ortalama aritmetik sapmasını tanımlar. R_q değeri ise yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının kuadratik ortalama değeridir. Kesilen parçaların üst yüzeylerindeki kerf genişlikleri ise Mitutoyo PJ-A3005D-50 model profil projektör cihazı ile ölçülmüş, her bir numuneden 3 adet ölçüm alınarak ortalaması kaydedilmiştir.

3. BULGULAR ve SONUÇLAR

Kesilmiş numunelere örnek olarak en yüksek ve en düşük pürüzlülük değerlerine sahip numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2:

Kesilmiş parçalardan alınan örnek yüzey görüntüleri; a. 2 numaralı numune b. 12 numaralı numune

Şekil 2a'da görülen 2 numaralı numunenin (LG: 4000 W, KH: 1600 mm/dak ve OM: -4 mm) Ra ve Rq değerleri sırası ile 4,66 μm ve 5,92 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 2b'de görülen 12 numaralı numunenin (LG: 3750 W, KH: 1600 mm/dak ve OM: -5 mm) Ra ve Rq değerleri ise sırası ile 10,9 μm ve 13,22 μm olarak ölçülmüştür. Bu iki numunenin kerf genişlikleri ise sırası ile 0,3 μm ve 0,42 μm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüklerinin yanı sıra kesim sonrasında oluşan cüruf miktarları da 12 numaralı numunede oldukça fazladır.

Box-Behnken deneysel tasarım yöntemi kullanılarak elde edilen deney seti ve ölçülen değerler Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de elde edilen değerler ve parametreler kullanılarak her bir ölçüm değeri (yüzey pürüzlülükleri (Ra, Rq) ve kerf genişliği (Kw) için ikinci dereceden polinomal fonksiyonlar oluşturulmuştur (Eş. 2-4). Lazer gücü (LG) ve kesme hızı (KH) parametrelerinin ikinci derece terimlerinin etkisi çok düşük çıktığı ve tahmin yeteneğini düşürdüğü için denklemlere dâhil edilmemiştir.

Tablo 2. Deneysel tasarımı ve ölçülen değerler

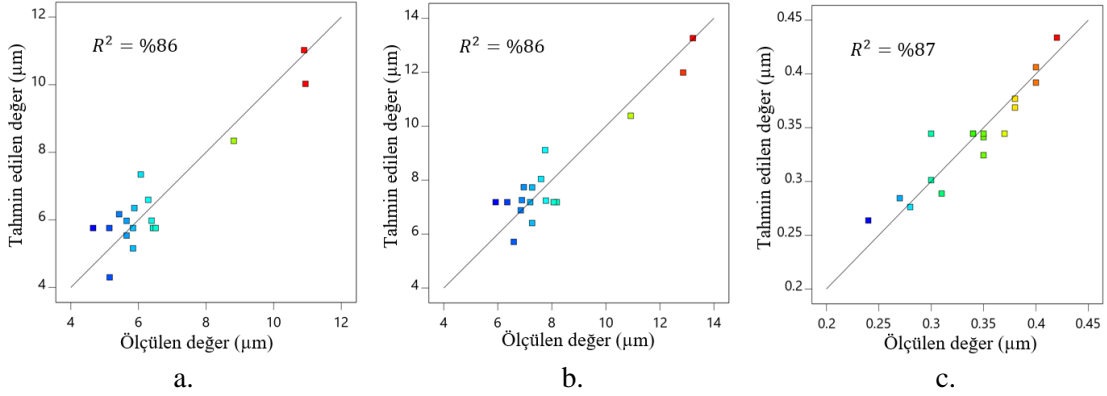
Deney No	İşlem Parametreleri			Ölçülen Değerler		
	LG (W)	KH (mm/dak)	OM (mm)	Pürüzlülük (μm)		Kerf Genişliği (μm)
				Ra	Rq	
1	4000	1700	-5	8,82	10,92	0,38
2	4000	1600	-4	4,66	5,92	0,3
3	4250	1600	-3	5,88	7,27	0,3
4	4000	1700	-3	5,65	6,89	0,31
5	4000	1600	-4	6,43	8,18	0,35
6	4000	1500	-5	10,94	12,86	0,4
7	4250	1700	-4	5,15	6,59	0,27
8	4000	1600	-4	6,51	8,07	0,37
9	3750	1600	-3	5,84	7,27	0,24
10	4250	1500	-4	6,39	7,78	0,38
11	4000	1600	-4	5,84	7,2	0,34
12	3750	1600	-5	10,9	13,22	0,42
13	4000	1500	-3	5,65	6,85	0,28
14	3750	1700	-4	6,29	7,6	0,4
15	4000	1600	-4	5,14	6,35	0,34
16	4250	1600	-5	6,07	7,75	0,35
17	3750	1500	-4	5,43	6,96	0,35

$$Ra = -205,055 + 0,050595 \times LG + 0,102075 \times KH - 16,00375 \times OM - 0,000021 \times LG \times KH + 0,00487 \times LG \times OM + 0,0053 \times KH \times OM + 1,70875 \times OM \times OM \quad (2)$$

$$Rq = -190,025 + 0,04833 \times LG + 0,089938 \times KH - 16,29542 \times OM - 0,000018 \times LG \times KH + 0,00547 \times LG \times OM + 0,00495 \times KH \times OM + 1,94542 \times OM \times OM \quad (3)$$

$$Kw = -12,81667 + 0,003025 \times LG + 0,006837 \times KH - 0,848056 \times OM - 0,0000016 \times LG \times KH + 0,00013 \times LG \times OM + 0,000125 \times KH \times OM - 0,009444 \times OM \times OM \quad (4)$$

Ölçümler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri (Ra ve Rq) ve kerf genişliğine (Kw) ait regresyon denklemlerinin tahmin yeteneği (R^2) sırası ile %86, %86 ve %87 olarak kabul edilebilir seviyelerde çıkmıştır. Şekil 3'te yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler ile regresyon denklemleri aracılığı ile tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması verilmiştir. Grafiklerdeki işaretli noktalar tahmin değerlerini göstermekte olup, bu noktaların yine grafik içerisindeki doğrusal çizgiye olan yakınlığı tahmin edilen değerlerin gerçek değerler ile olan uyumunu göstermektedir.



Şekil 3:

Deneysel olarak ölçülen ve tahmin edilen değerlerin karşılaştırılması; a. Ra değerleri, b. Rq değerleri ve c. Kerf genişlikleri

Kesme parametrelerinin (lazer gücü, kesme hızı, odak mesafesi) yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerindeki tekil ve etkileşimli etkilerini belirlemek adına varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir (Tablo 3-5). Tablolarda görülen ve bir parametre veya etkileşiminin ölçülen değer üzerindeki etkisini ifade eden p-olasılık değerleri incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği için de odak mesafesi ve odak mesafesi-lazer gücü etkileşimi en büyük etkiye sahip parametreler olduğu görülmüştür. Yüzdesel katkı oranları bakımından tekil parametreler arasında odak mesafesi en önemli etkiye sahip parametre olarak görülmüştür. Odak mesafesi-lazer gücü etkileşiminin yüzdesel katkısı Ra için %10,67 ve Rq için %10,11 olmuştur. Kerf genişliği için lazer gücü-kesme hızı etkileşimi %15,7, odak mesafesi-lazer gücü etkileşimi ise %10,3 olmuştur. Kesme hızının etkisinin her üç ölçüm içinde oldukça kısıtlı kaldığı görülmüştür.

Tablo 3. Yüzey pürüzlülük değeri Ra için ANOVA tablosu

	df	SS	F	p	% Katkı
Model	7	47,89	8,05	0,0029	
LG	1	3,09	3,63	0,0890	5,52
KH	1	0,78	0,92	0,3627	1,41
OM	1	23,50	27,64	0,0005	42,32
LG x KH	1	1,10	1,32	0,2841	1,98
LG x OM	1	5,93	6,98	0,0269	10,67
KH x OM	1	1,12	1,32	0,2799	2

OM x OM	1	12,37	14,55	0,0041	22,31
Hata	9	7,65			13,79
Toplam	16	55,54			100

*df: Serbestlik derecesi, SS: Kareler toplamı, F: F test değerleri, p: Olasılık değeri

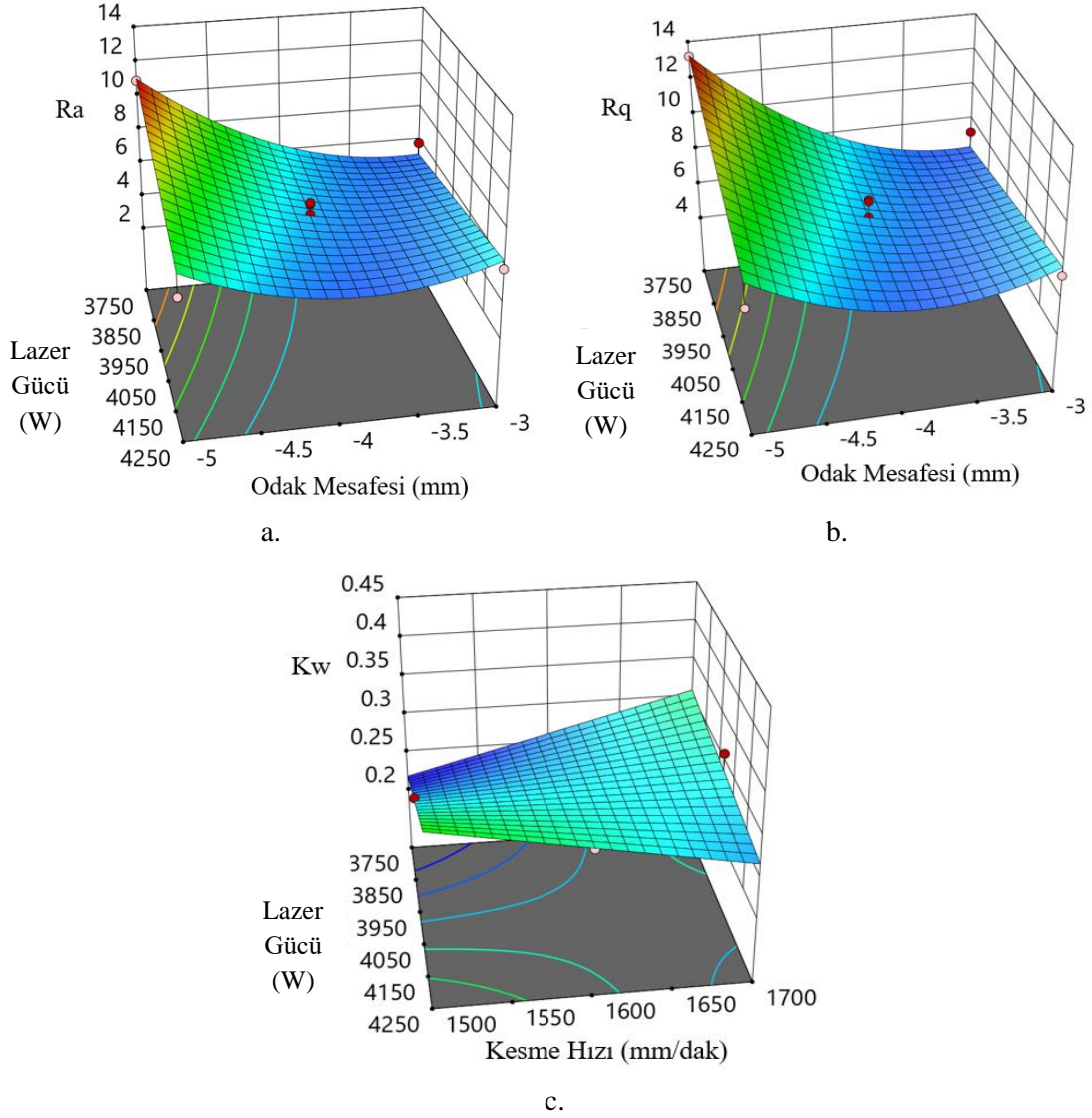
Tablo 4. Yüzey pürüzlülük değeri Rq için ANOVA tablosu

	df	SS	F	p	% Katkı
Model	7	63,99	8,29	0,0026	
LG	1	4	3,63	0,0890	5,4
KH	1	0,75	0,68	0,4308	1
OM	1	33,91	30,74	0,0004	45,9
LG x KH	1	0,84	0,76	0,4060	1,1
LG x OM	1	7,48	6,78	0,0285	10,1
KH x OM	1	0,98	0,88	0,3700	1,3
OM x OM	1	16,03	14,53	0,0041	21,7
Hata	9	9,93			13,4
Toplam	16	73,92			100

Tablo 5. Kerf genişliği Kw için ANOVA tablosu

	df	SS	F	p	% Katkı
Model	7	0,0355	8,96	0,0019	
LG	1	0,0015	2,67	0,1367	3,7
KH	1	0,0003	0,55	0,4765	0,7
OM	1	0,0220	38,93	0,0002	54,2
LG x KH	1	0,0064	11,30	0,0084	15,8
LG x OM	1	0,0042	7,46	0,0232	10,4
KH x OM	1	0,0006	1,10	0,3209	1,5
OM x OM	1	0,0004	0,67	0,4352	1
Hata	9	0,0051			12,5
Toplam	16	0,0406			100

Elde edilen varyans analizi sonuçları ile 3 boyutlu yüzey grafikleri çizdirilmiş ve işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir (Şekil 4). Grafiklerde cevaplar üzerinde en büyük % etkiye sahip etkileşimli parametre kombinasyonları kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri lazer gücü-odak mesafesine bağlı olarak incelenmiş, kerf genişliği ise lazer gücü-kesme hızına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4a ve 4b sabit kesme hızı ile (1600 mm/dak) çizdirilmiş ve yüzey pürüzlülüklerinin düşük lazer gücü ve odak mesafesinin -3 mm'ye yaklaşması ile azaldığı görülmüştür. Şekil 4c ise sabit odak mesafesi (-3 mm) ile çizdirilmiş ve kerf genişliğinin lazer gücü ve kesme hızının azalması ile azaldığı görülmüştür.



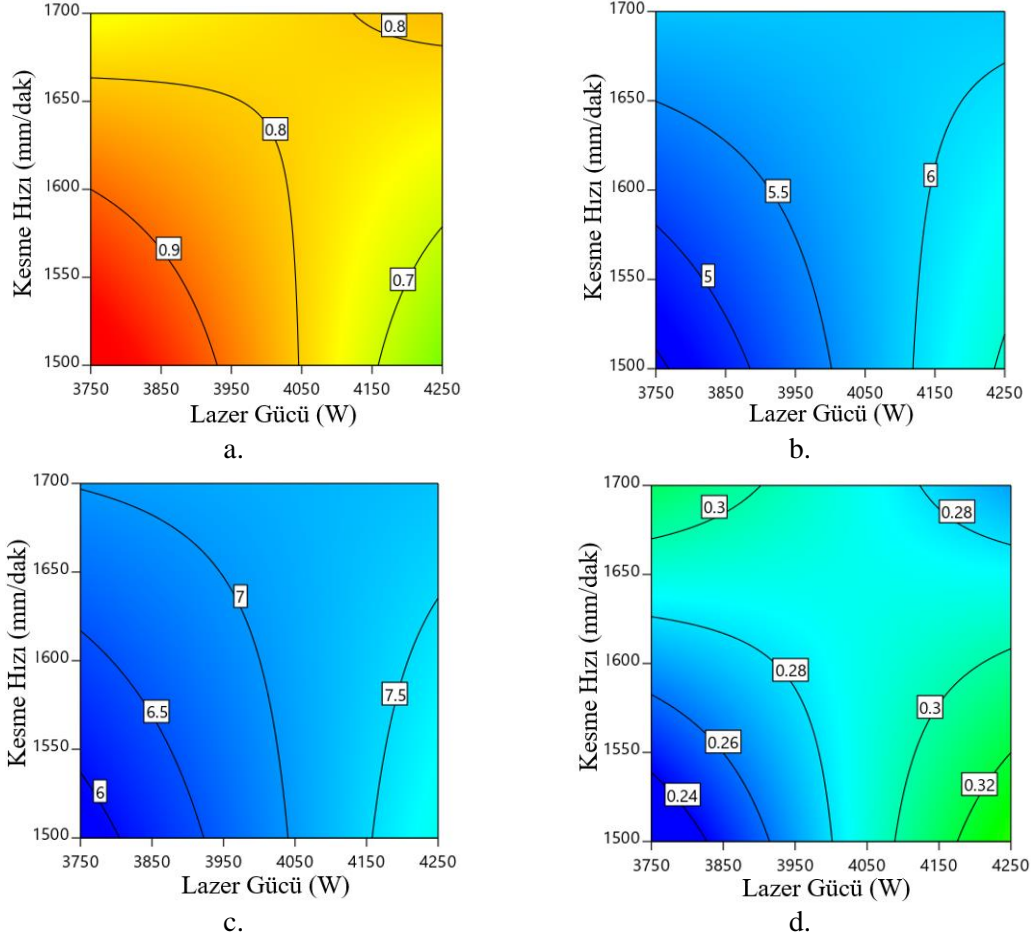
Şekil 4:
Proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliğine olan etkilerinin 3B grafikleri;
a. Ra, b. Rq ve c. Kw

Çalışmanın son aşamasında minimum yüzey pürüzlülüğü ve minimum kerf genişliği elde edebilmek için İstenebilirlik (Desirability) fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Bu yaklaşımda her bir cevap değişkeni 0-1 arasında değer alabilen ve d_t olarak tanımlanan tekil istenebilirlik değerine dönüştürülür. Bu dönüştürme çalışmanın amacı minimum yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği olduğu için Ra, Rq ve Kw değerlerinin minimum olması hedeflenerek proses parametreleri optimize edilmiştir. Her bir cevap için ağırlık değerleri eşit seçilmiştir. Optimizasyon için belirlenen kriterler dikkate alınarak oluşturulan tablo aşağıda verilmiştir (Tablo 6). Tablodan da görüleceği gibi, Ra, Rq ve Kw değerleri lazer gücünün 3776,4 W, kesme hızının 1500,92 mm/dak ve odak mesafesinin -3,041 mm olarak seçildiği durumda minimum değerlere ulaşılmıştır. Bu durumda Ra, Rq ve Kw sırası ile 4,54 μm , 5,88 μm ve 0,22 μm olarak tahmin edilmiştir.

Tablo 6. Optimum işlem parametreleri ve tahmin edilen yüzey pürüzlülük değerleri

	Ölçülen Değerler (μm)		Hedef	Optimum Parametreler			Tahmin Edilen Değerler (μm)
	Alt Limit	Üst Limit		LG (W)	KH (mm/dak)	OM (mm)	
Ra	4,66	10,94	Minimum	3776,4	1500,92	-3,041	4,54
Rq	1500	1700					5,88
Kw	0,24	0,42					0,22

İstenebilirlik analizi sonucunda elde edilen değerler yardımı ile çizdirilen kontur grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Çizdirilen grafiklerde sabit odak mesafesinde (-3,041 mm) lazer gücü ve kesme hızına bağlı olarak Ra, Rq ve Kw değerleri görülmektedir. Optimum değerlerin yaklaşık olarak 3770 W ve 1500 mm/dak değerlerinde olduğu kontur grafiklerinden de görülmektedir. Optimum proses parametre seviyelerinde ortalama istenebilirlik değeri 0,99 olarak oldukça iyi bir seviyededir (Şekil 5a).

**Şekil 5:**

a. İstenebilirlik değeri grafiği, **b.** Optimum Ra grafiği, **c.** Optimum Rq grafiği ve **d.** Optimum Kw grafiği

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 8 mm kalınlığında 304 kalite paslanmaz çelik malzemenin fiber lazer tezgahında kesilmesinde işlem parametrelerinin (lazer gücü, kesme hızı ve odak mesafesi) tekil ve etkileşimli etkileri tespit edilmiş ve optimum işlem parametreleri tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle Box-Behnken deneysel tasarım metodu kullanılarak oluşturulan deney tablosuna bağlı deneyler yapılmış ve yüzey pürüzlülük değerleri ile kerf genişlikleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler ile ikinci dereceden regresyon denklemleri oluşturularak parametrelerin etkileri 3B grafikler yardımı ile incelenmiştir.

Elde edilen ölçüm değerleri ile oluşturulan regresyon denklemlerinin tahmin yeteneği %86 ve %87 olarak kabul edilebilir seviyelerdedir. Yapılan varyans analizleri neticesinde yüzey pürüzlülüğü ve kerf genişliği üzerinde en büyük etkiye sahip tekil parametrenin odak mesafesi olduğu, odak mesafesi-lazer gücü etkileşiminin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ikinci büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kerf genişliği için ise lazer gücü-kesme hızı etkileşiminin ikinci büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çalışmanın son kısımda istenebilirlik fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda lazer gücü, kesme hızı ve odak mesafesi için optimum değerler sırası ile 3776,4 W, 1500,92 mm/dak ve -3,041 mm olarak hesaplanmıştır. Bu parametre seviyelerinde Ra değeri 4,54 µm, Rq değeri 5,88 µm ve Kw değeri 0,22 µm olarak tahmin edilmiştir. Optimum parametre seviyelerinde ortalama istenebilirlik değerinin 0,99 olarak kabul edilebilir olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında deney numunelerinin hazırlanması ve lazerle kesme işlemleri sırasında yaptıkları katkılardan dolayı Körüstan Bursa Sac Pres Sanayi Tic. AŞ adına Cem Körüstan'a teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

1. Çavdar, K. ve Tanrısever, T. (2013) Farklı malzemelerin lazerle kesilmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 18(2), 79-99. 2018.
2. Durukan, Z., Motorcu, A.R. ve Güllü, A. (2014) AISI 304 çeliğini farklı geometrilerde lazerle kesmede parametrelerin boyutsal doğruluk üzerine etkilerinin modellenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(3), 505-515. <http://dx.doi.org/10.17341/gummfd.80157>
3. Dubey, A.K. ve Yadava, V. (2008) Multi-objective optimisation of laser beam cutting process, Optics and Laser Technology, 40(3), 562-570. [doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2007.09.002)
4. Fomin, V.M., Golyshev, A.A., Malikov, A.G., Orishich, A.M. ve Shulyat'ev, V.B. (2015) Mechanical characteristics of high-quality laser cutting of steel by fiber and CO₂ lasers, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 56(4), 726-735. [doi.org/10.1134/S0021894415040203](http://dx.doi.org/10.1134/S0021894415040203)
5. Jarosz, K., Löschner, P. ve Nieslony, P. (2016) Effect of cutting speed on surface quality and heat-affected zone in laser cutting of 316L stainless steel, Procedia Engineering 149; 155 – 162. [doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.650](http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.650)
6. Karthikeyan, R., Senthilkumar, V., Thilak, M. ve Nagadeepan, A. (2018) Application of grey relational analysis for optimization of kerf quality during CO₂ laser cutting of mild steel, Materials Today: Proceedings, 5(9), 19209-19215. [doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.276](http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.276)

7. Kotadiya, D.J., Kapopara, J.M., Patel, A.R., Dalwadi, C.G. ve Pandya D.H. (2018) Parametric analysis of process parameter for Laser cutting process on SS-304, *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 5384–5390. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.124
8. Kotadiya, D.J. ve Pandya, D.H. (2016) Parametric Analysis of Laser Machining with Response Surface Method on SS-304, *Procedia Technology*, 23, 376–382. doi.org/10.1016/j.protcy.2016.03.040
9. Mullick, S., Agrawal, A.P. ve Nath A.K. (2016) Effect of laser incidence angle on cut quality of 4 mm thick stainless steel sheet using fiber laser, *Optics and Laser Technology*, 81, 168–179. doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.02.006
10. Parthiban, A., Chandrasekaran, M. ve Sathish, S. (2018) Optimization of CO₂ Laser Cutting of Stainless Steel Sheet for Curved Profile, *Materials Today: Proceedings*, 5(6), 14531–14538. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.03.042
11. Rana, R.S., Chouksey, R., Dhakad, K.K. ve Paliwal, D. (2018) Optimization of process parameter of Laser beam machining of high strength steels: A review, *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19191–19199. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.274
12. Stelzer, S., Mahrle, A., Wetzig, A. ve Beyer, E. (2013) Experimental investigations on fusion cutting stainless steel with fiber and CO₂ laser beams, *Physics Procedia*, 41, 399–404. doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.093
13. Wandera, C. ve Kujanpää, V. (2011) Optimization of parameters for fibre laser cutting of a 10 mm stainless steel plate, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(5), 641–649. doi.org/10.1177/2041297510394078
14. Wandera, C., Kujanpää, V. ve Salminen, A. (2011) Laser power requirement for cutting thick-section steel and effects of processing parameters on mild steel cut quality, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(5), 651–661. doi.org/10.1177/09544054JEM1971
15. Wandera, C., Salminen, A. ve Kujanpää, V. (2009) Inert gas cutting of thick-section stainless steel and medium-section aluminum using a high power fiber laser, *Journal of Laser Applications*, 21(3), 154–161. doi.org/10.2351/1.3184429
16. Yilbas, B.S., Shaukat, M.M. ve Ashraf, F. (2017) Laser cutting of various materials: Kerf width size analysis and life cycle assessment of cutting process. *Optics and Laser Technology*, 93, 67–73. doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.02.014

