

AISI 304 ÇELİĞİNİN LAZER İLE KESİLMESİNDE KESME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

^{1,2}Faruk Mert, ^{3,4*}Murat Tunç, ⁴Gökhan Sur

¹ Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering Gazi University, Turkey

²Magnum Mühendislik Medikal San. ve Tic. Ltd. Şti, Ankara, Turkey

³Telmek A.Ş., Ankara, Turkey

⁴Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabük University, Turkey

Abstract

In this study, the effects of cutting parameters on the cutting process of AISI 304 stainless steel sheets using CO₂ laser machines were investigated. In the experiments, the cutting parameters such as power, speed, focus distance, auxiliary gas and pressure were changed and the effects of these parameters on the surface roughness were evaluated. A special fixture was used to fix the cut samples and the roughness values formed on the laser cutting surface were measured using a surface roughness tester. It is concluded that surface roughness on the laser cutting is reduced with increasing pressure, decreasing power and feed rate using nitrogen (N₂) auxiliary gas. Ideal parameters in terms of the best surface quality were found as 1700 W power, 9 bar gas pressure and 1600 mm / min feed rate with N₂ auxiliary gas when cutting of AISI 304 stainless steel sheets using CO₂ laser machines.

Key words: CO₂ laser cutting, Cutting parameters, Surface roughness

Özet

Bu çalışmada, CO₂ lazer tezgâhlarında kullanılan kesme parametrelerinin AISI 304 kalite paslanmaz çelik sacların kesim işlemine etkileri incelenmiştir. Deneylerde güç, hız, focus mesafesi, yardımcı gaz basınç gibi kesme parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri değerlendirilmiştir. Kesilen parçaların sabitlenmesi için özel bir fişktür yapılarak lazer kesim yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerleri profilmetre yardımı ile ölçülmüştür. Lazer kesim yüzeyi pürüzlülük değerinin azot (N₂) yardımcı gazı kullanılarak artan basınç, azalan kesim gücü ve ilerleme miktarı ile düştüğü sonucuna varılmıştır. AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemelerin CO₂ lazer tezgâhlarında kesilmesinde 1700 W kesme gücünün, 9 bar gaz basıncının ve 1600 mm/dak ilerleme hızında azot (N₂) yardımcı gazı ile en iyi yüzey kalitesi açısından ideal parametreler olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CO₂ lazerle kesme, Kesme parametreleri, Yüzey pürüzlülüğü

1. Introduction

Lazer teknolojisi son yıllarda önemli gelişmeler göstermiş ve birçok önemli sektörde karşımıza çıkmaktadır. Lazer teknolojisi özellikle askeri uygulamalarda, elektronik ve bilgisayar sektöründe, havacılık alanında, tıp biliminde, imalat endüstrisinde yaygın bir kullanım alanına sahiptir [1-3]. Mühendislik açısından incelendiğinde lazer ışıını kaynak, kesme ve delme işlemlerinde önemli bir uygulama alanına sahiptir. Kesme işlemi, lazer ışıınının kesilecek olan

*Corresponding author: Address: Telmek A.Ş., 06830, Ankara, Turkey
E-mail address: dr.murattnc@gmail.com, Phone: +905326803897

metal yüzeyinin kesim bölgesine yoğunlaşması sırasında gerçekleşir. Karbondioksit (CO₂) lazer tezgahları, maliyet ve performans açısından kesme yönteminde en yaygın kullanılan lazer türüdür [4]. Teknolojide önemli bir dönüm noktası oluşturan bu yöntem sektörün önde gelen tüm alanlarında çeşitli metotlarda ve farklı malzemeler üzerinde kullanılmaktadır. Bu malzemelerin başında ahşap, polimer, nikel alaşımları, çelik, krom alaşımları, titanyum alaşımları, paslanmaz çelik, alüminyum ve alaşımları gelmektedir [5].

Hızla gelişen lazer teknolojileri sonucunda, günümüze kadar birçok lazer çeşidi geliştirilmiş. Literatürde yapılan çalışmalarda birçok bilim insanının gelişen bu teknoloji alanında çalışması olduğu gözlemlenmiştir. Nagaraja [6], lazer kesme esnasında oluşan maliyetlerin sebeplerini araştırdığı çalışmasında lazer parametrelerinden olan yardımcı gaz, güç, malzeme kalınlığının ve diğer faktörlerin doğru tayin edilmesinin işletmeleri gerçek zamanlı üretim için, kayıpların azaltılmasında önemli bir yeri olduğunu hesaplamalarla ortaya koymuştur. Yılbaş [7], paslanmaz çelik levhaları CO₂ lazer ile işleyerek yaptığı deneylerde, parametre olarak kesme hızı, yardımcı gaz basıncı, levha kalınlığı ve lazer puls frekansı olarak kesme kalitesinde ölçülebilir değişkenleri gözlemlemiştir. Elde edilen sonuçlar seçilen her parametrenin lazer kesimine etkisinin belirgin olduğunu göstermiştir. Rajaram ve arkadaşları [8], CO₂ lazer ile kesme işleminde kesme kalitesini inceledikleri çalışmalarında AISI 4130 çelik numunelerini kesmiş, lazer gücü ve kesme hızının kesme aralığı, yüzey pürüzlülüğü, oyuk sıklığı ve ısı tesiri altında kalan bölge büyüklüğüne etkilerini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler ile birlikte lazer gücünün kesme aralığında önemli bir etkisi olduğu halde kesme hızının daha az etkisi olduğunu gözlemişlerdir. Ayrıca kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne ve oyuk oluşumunda önemli etkisi olduğunu görmüş, hız artırıldığında yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığını belirlemişlerdir. Patel ve Patel [9], Hardox-400 malzemelerin lazer tezgâhında kesiminde lazer gücünü, gaz basıncını, meme çapını ve kesme hızı etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, kesme aralığının güç, kesme hızı, gaz basıncı ve frekansa bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Öner [10], lazer ile kesmede uygun parametrenin seçimi kesme kalitesi açısından çok önemli olduğunu ve AISI 304 paslanmaz çeliğin CO₂ ile kesiminde yüksek güç ve yüksek hızlarda daha düzgün yüzeyler elde edileceğini bulmuştur. Başka araştırmacılar da çeşitli malzemelerin lazer ile kesimi hakkında yaptıkları deneysel çalışmalarda sistem parametrelerinin, seviyelerinin etkileri ve optimum parametrelerin bulunması konusunda Taguchi Yöntemi'nin kullanılmasının önemli avantajlar sağladığını tespit etmişlerdir [11-15].

CO₂ lazer tezgahlarında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri üzerine yapılan araştırmaların % 90' nında parametrelerin etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin endüstride en yaygın kullanım alanına sahip olan CO₂ tezgahlarında kesme şartlarını iyileştirdiği kanaatine varılmıştır. CO₂ lazer tezgahlarında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri üzerine yapılan çalışmalarda parametrelerin incelenmesi ve birbirleri üzerine etkilerini kıyaslayan çalışma sayısının yetersiz olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar genellikle lazerin genel yapısı, ilerleme hızı ve güç parametreleri üzerinde yoğunlaştırılıp, focus mesafesi, yardımcı gaz, etkilerini dikkate alan çalışama sayısının da eksik olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, paslanmaz AISI 304 kalite paslanmaz malzemede en iyi kesme şartlarının hangi güç, focus, basınç, yardımcı gaz ve ilerleme hızında olduğu karşılaştırmalı olarak tespit edilmiştir. Seçilen kesme koşullarının kesme üzerine etkileri grafiklerle anlatılmıştır.

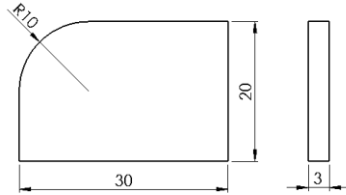
2. Materials and Method

Deneylerde kullanılmak üzere, endüstride yaygın olarak kullanılan, 400 °C'ye kadar yüksek oksidasyon sağlayan, mekanik direnç ve sürtünme mukavemeti yüksek olan 3 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik sac seçilmiştir. Kullanılan AISI 304 paslanmaz malzemede %12-25 Cr ve %8-25 Ni içermektedir ve manyetiklik özellikleri yoktur, kaynak kabiliyeti yüksektir. Deneylerde kullanılan AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 304 kalite paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim çizelgesi [16].

Element	Fe	C	Cr	Ni	Mn	Si
Miktar (% ağı.)	65-71	0,08	18-20	8-12	2	0,075

Paslanmaz çelikler çok değişik kalitelerde üretilen malzemelerdir. Bu nedenle malzeme seçiminde sadece mekanik ve kimyasal değerler göz önünde bulundurulmamalıdır. Bunun yanında malzemenin boyutları ve yüzey özellikleri gibi unsurlar da dikkate alınmalıdır. Deneylerde, imalat kolaylığı, kesim sonrası ölçüm esnekliği ve maliyet etkenlerinden dolayı Şekil 1'de görülen geometrinin kesilmesine karar verilmiştir. Kesilecek geometri ve boyutları belirlemede keskin köşeler radyüs dönüşleri olması gözönünde bulundurulmuştur.



Şekil1. Deneylerde kesilen geometri

Deneyler, en yüksek güç kapasitesi 2500 W olan “Mazak SpaceGear” marka CO₂ lazer tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Kesme deneylerinde kullanılan CNC lazer kesim tezgâhı ile ilgili teknik özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. “Mazak Space Gear” CO₂ CNC lazer kesim makinası teknik özellikleri [17]

Tezgah Modeli		Mazak Space Gear
Osilatör Gücü, Kw		2,5
Maksimum İş Parçası Ölçüsü, mm		3000 x 1500
Maksimum Yükleme Kapasitesi, Kg		930
X / Y / Z Eksen Hareketleri, mm		3070 / 1545 / 100
Eksen Hızları, mm/dak		120
İvmelenme Değeri, G		3
İvmelenme Değeri, G		3
Pozisyonlama Hassasiyeti, mm		± 0,01
Tekrarlama Hassasiyeti, mm		± 0,005
Max. Kesme Kalınlığı	İmalat Çeliği, mm	25
	Paslanmaz Çelik, mm	15
	Alüminyum, mm	15

Deneylerin yapılması esnasında CNC CO₂ lazer kesim tezgâhında kullanılan sabit ve değişken parametreler Tablo 3'te belirtilmiştir. Ön deney çalışmaları neticesinde ideal focus mesafesi ve ideal gaz tespit edilmiştir.

Tablo 3. Kesme deneylerinde, kullanılan sabit ve değişken parametreler

Sabit Parametreler	
İşleme Tezgâhı	Mazak Space Gear
Duty	%100
Mercek, inch	7,5''
Nozzle, mm	Ø 3
Focus Mesafesi, mm	0
Malzeme tipi/kalınlık, mm	AISI 304 / 3
Değişken Parametreler	
Güç, W	1700, 2000, 2400
Gaz Basıncı, Bar	7, 8, 9
İlerleme, mm/dk	1600, 2000, 2400
Yardımcı Gaz	Hava, O ₂ , N ₂

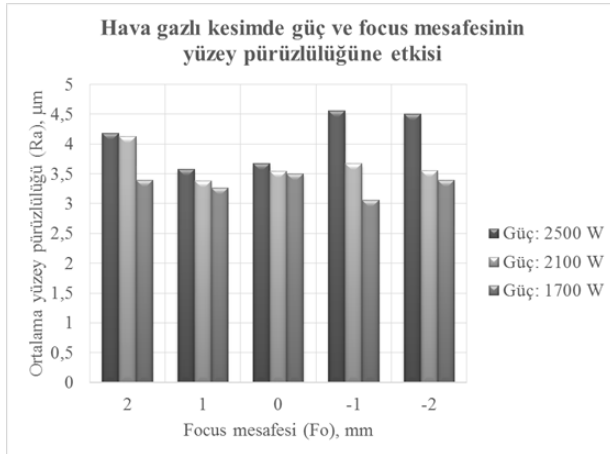
Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde TR200 Surface Roughness Tester cihazı kullanılmıştır [18]. Her ölçüm öncesi cihaz kalibrasyonu yapılmıştır. Kesilen parça üzerinde farklı yüzeylerden alınan 5 adet Ra yüzey pürüzlülüğüne ait değerlerin aritmetik ortalaması alınarak numuneye ait yüzey pürüzlülük değeri belirlenmiştir.

3. Results and Discussion

Lazerle kesim işlemlerinde ürün kalite göstergesini belirlemede kullanılan yöntemler farklılık arz etmektedir. Bunlar arasında kesilen iş parçası üzerinde boyutsal toleranslara uygunluk, yüzey pürüzlülüğü, kerf boşluğu, çapak (dross) miktarı, termal deformasyon miktarı sayılabilir. Bu çalışmada lazer kesim işleminin etkinliğinin değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğüne odaklanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçüsel farklılıklar, çapaklanmalar, kesilen parçanın işlevselliğinin yerine getirememesine sebebiyet vermektedir. İşletmeler açısından incelendiğinde, bu sorunlar işletmelerin fire olarak adlandırdığı atık sac parçaları artmasına böylelikle birim parça maliyetleri, zaman kayıpları, ek işçilik gibi faktörlerde maliyetlere yansıtılmasına neden olmaktadır. Çalışmada değişken kesim parametreleri olarak belirlenen parametrelerle (güç, yardımcı gaz, ilerleme hızı ve basınç) ilgili kesme işlemi sonrası yüzey kalitesine etkilerinin belirlenmesine yönelik kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Hava gazı ile kesimde güç ve focus belirlemeye yönelik deney sonuçları

Hava gazı ile kesimde elde edilen deney sonuçları kullanılarak elde edilen grafik Şekil 2'de sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.

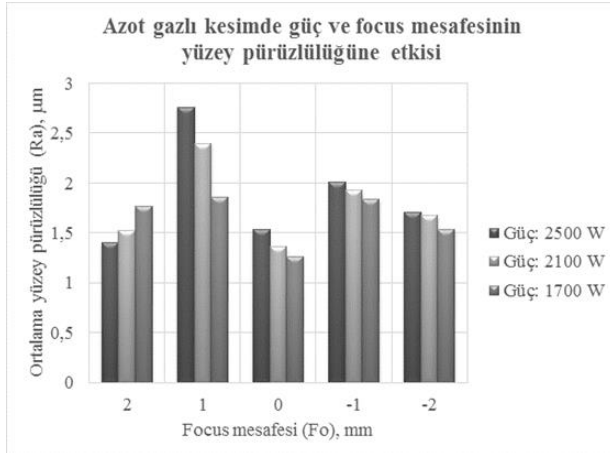


Şekil 2. Hava gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 2 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1700 W güç değerinde -1 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Tüm focus değerlerinde azalan kesme gücü (2500~1700 W) ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Bunun nedeni kesilen yüzeyde ısı etkisi altında kalan bölgenin termal olarak etkilenmesi olarak düşünülmektedir. Benzer durum Öner'in [10] çalışmalarında da görülmüştür.

3.2. Azot gazı (N_2) ile kesimde güç ve focus belirlemeye yönelik deney sonuçları

Azot gazı (N_2) ile kesimde elde edilen deney sonuçları kullanılarak elde edilen grafik de Şekil 3'te sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.



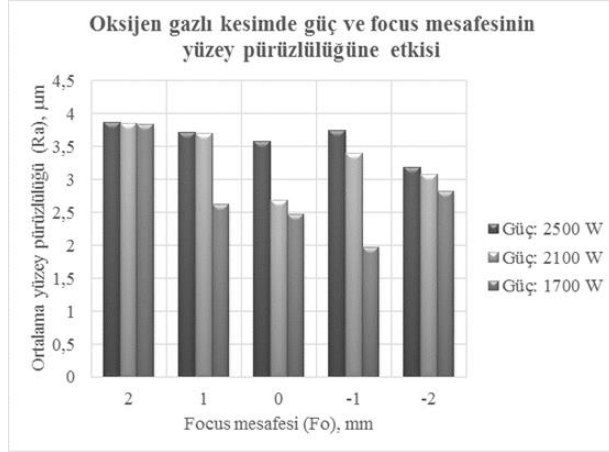
Şekil 3. Azot gazı (N_2) ile kesimde güç ve focus mesafesinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 3 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğü 1700 W güç değerinde 0 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir. Focus değerlerinden 1, 0, -1 ve -2'de azalan kesme gücü (2500~1700 W) ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği focus değeri 2'de ise durumun tersine döndüğü tespit edilmiştir. Bunun nedeni, odak noktasının yukarı yönlü

artmasıyla birlikte kesilen yüzeyde ısı etkisinin yüzey kalitesi üzerindeki kötü etkisinin azalmasına bağlanmıştır.

3.4. Oksijen gazı (O_2) ile kesimde güç ve focus belirlemeye yönelik deney sonuçları

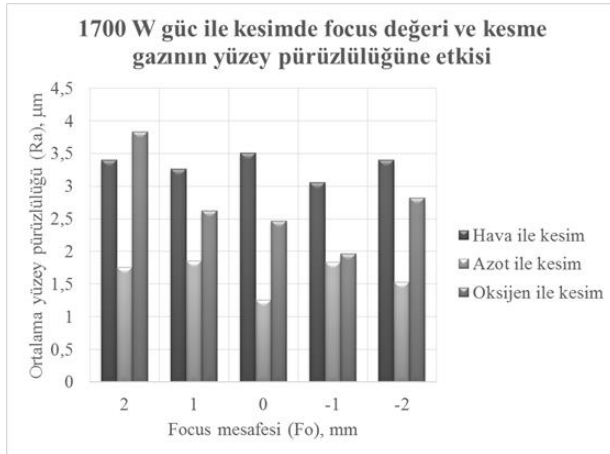
Oksijen gazı (O_2) ile kesimde elde edilen deney sonuçları kullanılarak elde edilen grafik de Şekil 4'te sunulmuştur. Güç ve focus değerinin belirlenmesinde en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği işleme şartları dikkate alınmıştır.



Şekil 4. Oksijen gazı ile kesimde güç ve focus mesafesinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Oksijen gazı (O_2) ile gerçekleştirilen kesme deneylerinde de azot gazı (N_2) ile gerçekleştirilen kesme deneylerinde olduğu gibi azalan güç değerleri ile birlikte tüm focus değerlerinde kesilen yüzeydeki yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmektedir. Güç en önemli parametre iken focus değeri ise sadece düşük kesme gücünde etkili bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde en iyi yüzey pürüzlülüğünün, 1700 W güç değerinde ve -1 mm focus mesafesinde gerçekleştirilen kesme deneyinde elde edildiği görülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında en ideal kesme gücünün 1700 W güç değeri olduğu tespit edilmiştir. Bu güç değeri dikkate alınarak kesme gazlarına bağlı en iyi focus mesafesini gösteren grafik Şekil 5'te yer almaktadır.

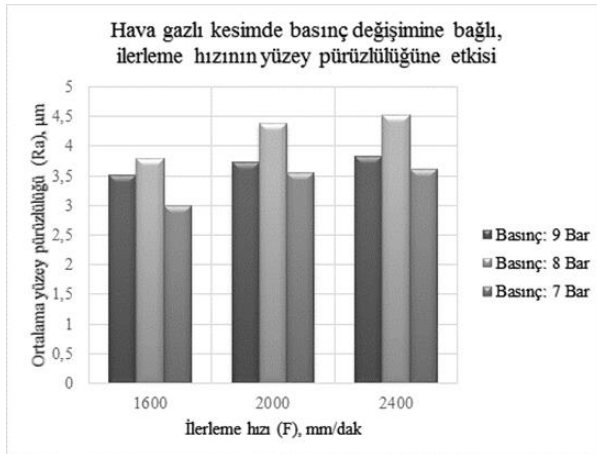


Şekil 5. 1700 W kesme gücünde focus mesafesinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 5 incelendiğinde 1700 W kesme gücünde en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği işleme parametrelerinin azot gazı (N_2) ile kesimde 0 mm focus mesafesinde olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç azot gazının asal gaz olması ve diğer gazlara kıyasla soğutucu akışkan görevi görmesine bağlanmıştır.

3.5. Kesme gazına bağlı olarak ilerleme hızı ve gaz basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri

İlerleme ve basınç birçok tezgâhta olduğu gibi lazer tezgâhlarında da kesme ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde büyük etkiye sahip bir parametredir. Birçok bilim insanı bu parametreler üzerine çeşitli araştırmalar yapmıştır. Bu çalışmada da lazer tezgâhlarında ilerleme ile basıncın etkileşimi değerlendirilmiştir. Şekil 6'da deney sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerini gösterimi bulunmaktadır.

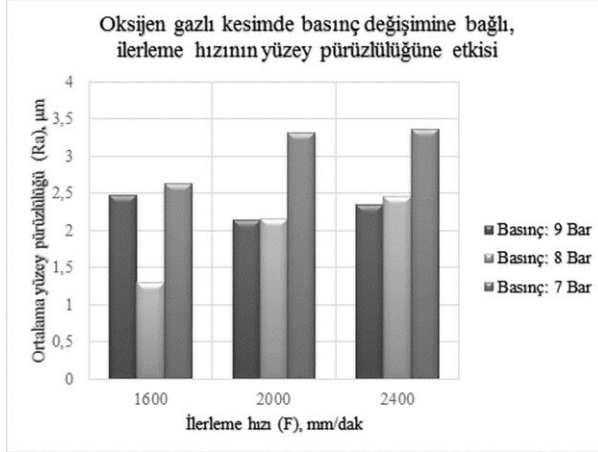


Şekil 6. Hava gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 6'da yardımcı gaz olarak seçilen hava 7 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. Ayrıca ilerleme hızının artmasıyla birlikte yüzey

pürüzlülüğünün tüm basınç değerlerinde kötüleştiği tespit edilmiştir.

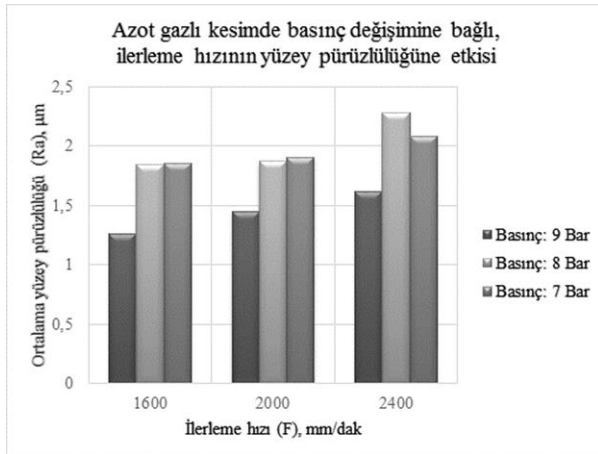
Şekil 7’de oksijen gazlı kesimde basınç değerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin belirlendiği grafik görülmektedir.



Şekil 7. Oksijen gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 7’e yardımcı gaz olarak seçilen oksijen 8 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmektedir. Oksijen gazı ile kesimde gaz basıncının ilerleme hızına kıyasla daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir.

Şekil 8’de azot gazlı kesimde basınç değerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin belirlendiği deney şablonu görülmektedir.



Şekil 8. Azot gazlı kesimde basınç değişimine bağlı ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisi

Şekil 8.’de yardımcı gaz olarak seçilen azot 9 bar basınç ve 1600 mm/dak ilerleme hızında en iyi yüzey pürüzlülük değerini vermektedir. İlerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerleri artış eğilimindedir. Diğer gazlara kıyasla gaz basıncının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azot

gazlı kesim için iyileştiği tespit edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü üzerinde, gaz basıncının ilerleme hızına kıyasla daha etkili bir parametre olduğu görülmektedir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında AISI 304 kalite 3 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik sacın CO₂ lazerle kesilmesinde en ideal kesme parametreleri aşağıdaki gibi olması gerektiği tespit edilmiştir. Bunlar;

- Güç: 1700 W
- Focus mesafesi: 0 mm
- Yardımcı gaz: Azot
- Yardımcı gaz basıncı: 9 bar
- İlerleme hızı: 1600 mm/dak şeklindedir.

Günümüzde enerji tasarrufunun önemi gittikçe artmaktadır, azalan yer altı zenginlikleri, küresel ısınma gibi etkenler enerji tasarrufunu devletlerin değişmez politikaları haline getirmektedir. Bütün bunlar söz konusu iken sanayide önemli bir yere sahip olan lazer tezgâhlarının yanlış kullanımlar sonucu fazla miktarda enerji sarfiyatı, ek işçilikler, kalitede azalmalar meydana gelmektedir.

Conclusions

Deneyssel ağırlıklı bu çalışmada CO₂ lazer kesim tezgâhlarında, AISI 304 kalite paslanmaz çeliğinin kesilmesi ile ilgili aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kesmeye yardımcı gazların yüzey kalitesi üzerinde etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir. AISI 304 kalite paslanmaz çelikler için en ideal kesmeye yardımcı gazın azot gazı (N₂) olduğu tespit edilmiştir.
- Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin var olduğu yapılan deneylerde gözlenmiştir. Malzeme cinsine bağlı en ideal kesme gücünün belirlenmesi, hem maliyet (enerji tüketimi, işçilik, vd.) hem de yüzey pürüzlülüğü açısından önem taşımaktadır. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için en ideal kesme gücünün 1700 W olduğu tespit edilmiştir.
- Yüzey kalitesi üzerinde focus mesafesinin etkili olduğu ve iş parçası malzemesine uygun en ideal focus mesafesinin belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için 1700 W güç değerinde, azot gazı ile kesimde en ideal focus mesafesinin 0 mm olduğu bulunmuştur.
- İlerleme hızının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği tespit edilmiştir. AISI 304 kalite paslanmaz çelik için en ideal ilerleme hızının 1600 mm/dak olduğu tespit edilmiştir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalara aşağıdaki öneriler tavsiye edilmektedir.

- Benzer çalışmanın diğer iş parçası malzemeleri içinde yapılması literatür açısından önemlidir.
- Benzer çalışmalar kerf boşluğu açısından da değerlendirilebilir.
- Kesilen bölgenin ısı tesiri ile termodinamik açıdan incelenmesi önerilir.
- Kesme sonrası ikincil işlemleri (çapak alma, görsellik, vd.) azaltmaya yönelik deneyler tasarlanabilir.

References

- [1] Kaluç E. “Lazer ışını ile kaynak ve kesme diğer kaynak yöntemleri”, *Kocaeli Üniversitesi Mühendisliği Bölümü*, İstanbul, 189-191 (1993).
- [2] Metiner H., “Lazerin çalışma prensipleri”, *Aselsan*, Ankara, 1-3, 4-5 (1995).
- [3] Tanrıverdi M. A., “Çelik Malzemelerin Lazer İle Kesilmesinde Kesme Bölgesinin Yapı ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 15, 10-14 (1995).
- [4] Acer H., “Lazer sistemleri” Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, 1-3 (1998).
- [5] Mungan C., “Lazer ile kesme ve Endüstriyel Uygulamaları” Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Antakya, 32- 37 (2006).
- [6] Nagaraja D., “Laser Cutting Machine Justification of initial costs”, *Mater Sci (Engineering Technology)*, 1, 53-68 (2001).
- [7] Yılbaş B. S., “Study of parameters for CO2 laser cutting process”, *Materials and Manufacturing Processes*, 13 (4): 517-536 (1998).
- [8] Rajaram J. S., Cheraghi H. S., “CO2 laser cut quality of 4130 steel” Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Wichita State University, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 351–358.
- [9] Patel J. M., Patel D. M., “ Parametric investigation in CO2 Laser Cutting Quality of Hardox-400 Materials ”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5979-5984 Vol. 3 No. 7 (July 2011).
- [10] Öner U., “Lazerle kesme parametrelerinin kesme aralığı ve yüzey kalitesine üzerindeki etkisinin incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-43 (2007).
- [11] Kasman, Ş., “Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deney Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi”, 5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük (2009)
- [12] Kasman Ş., “Lazerle Derin Oyma Tekniğinde EN 7075 Alüminyum Alaşımı için İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Taguchi Metodu Kullanılarak İncelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 8, No: 2, 2011* (41-54).
- [13] Kasman, Ş., “AISI 304 Paslanmaz Çelik ve EN 5754 Alüminyum Alaşımı Malzemelerin Fiber Lazer ile İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Tespiti İçin İstatistiksel Bir Çalışma”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt: 8, No: 2, 27-36, (2011)*
- [14] Madiç J. M., Radovanoviç R. M., “ Analysis of The Heat Affected Zone In CO2 Laser Cutting of Stainless Steel” *Thermal Science*, , Vol. 16, Suppl. 2, S363-S373, (2012)
- [15] Madiç J. M., Radovanoviç R. M., “Identification of the Robust Conditions for Minimization of the HAZ and Burr in CO2 Laser Cutting” *FME Transactions* 41, 130-137, (2013).
- [16] Durkan Z., Motorcu A. R., GüllüŞırnak A. , “AISI 304 çeliğini farklı geometrilerde lazerle kesmede parametrelerin boyutsal doğruluk üzerinde etkilerinin modellenmesi ” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 29:513-514 (2014).
- [17] <https://www.mazakoptonics.com/machines/space-gear-510-mk-ii/>
- [18] <http://www.labomaronline.com/time-tr-200-yuzey-puruzluluk-olcum-cihazlari-urun230.html>