

AISI 304 ÇELİĞİNİ FARKLI GEOMETRİLERDE LAZERLE KESMEDE PARAMETRELERİN BOYUTSAL DOĞRULUK ÜZERİNE ETKİLERİNİN MODELLENMESİ

Zülfünaz DURUKAN*, Ali Rıza MOTORCU**, Abdulkadir GÜLLÜ***

*Şırnak Üniversitesi, Şırnak Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Şırnak

**Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Çanakkale

***Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

zulfunaz@sirnak.edu.tr, armotorcu@comu.edu.tr, agullu@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 18.12.2013; Kabul/Accepted: 01.04.2014)

ÖZET

Bu çalışmada, 4 ve 6 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çelik malzeme üzerinden belirli ölçülerde üçgen, kare ve dairesel şekilli parçalar farklı kesme şartlarında CO₂ lazer kesim tezgâhı ile kesilmiş ve kesilen numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde kesme parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Bağımsız değişkenler olarak lazer gücü (W), kesme ilerlemesi (F), odak noktası (ON) ve gaz basıncı (P) seçilmiştir. Tam Faktöriyel Deneysel Tasarım Tekniği (TFT) kullanılarak bağımsız parametrelerin üç farklı seviyesinde 4 ve 6 mm kalınlığındaki sac malzemeler üzerinde toplam 486 deney yapılmıştır. 3 boyutlu koordinat ölçme tezgâhı (CMM) ile yapılan ölçümler sonucu elde edilen deneysel veriler kullanılarak üçgen, kare ve dairesel şekilli numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde lazer kesme parametrelerinin etkilerini içeren ikinci dereceden tahminsel modeller Regresyon Analizi ile geliştirilmiştir. %95 güven seviyesinde geliştirilen tahminsel denklemlerin korelasyon katsayıları $R^2=0,78$ 'in üzerinde elde edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, bağımsız parametrelerin boyutsal doğruluk üzerinde etkilerini gösteren ana etki grafikleri oluşturulmuş ve parametrelerin etkileri değerlendirilmiştir. Kesilen parçaların boyutsal doğruluğu üzerinde en etkili parametreler sırasıyla lazer gücü, kesme ilerlemesi ve odak noktası olmuştur.

Anahtar Kelimeler: CO₂ Lazerle Kesme, AISI 304 Çeliği, Kesme Parametreleri, Boyutsal Doğruluk.

MODELING OF THE EFFECTS OF PARAMETERS ON DIMENSIONAL ACCURACY IN LASER CUTTING OF AISI 304 STEEL WITH DIFFERENT GEOMETRIES

ABSTRACT

In this study, some certain sizes of triangular, square and circular shaped parts have been cut through CO₂ laser cutting centre over a 4 and 6 mm thickness of AISI 304 stainless steel material at different cutting conditions and the effects of cutting parameters were investigated on the dimensional accuracy of the samples. As the independent variables, laser power (W), cutting feed rate (F), focus point (ON) and gas pressure (P) have been selected. By using Full Factorial Experimental Design Technique (TFT), a total of 486 experiments have been carried out on the 4 and 6 mm thick sheet materials at three different levels of the independent parameters. Using the experimental data obtained as a result of the measurements made with three-dimensional coordinate measurement machine (CMM), the second-order predictive models, including the effects of laser cutting parameters on the dimensional accuracy of the triangular, square and circular-shaped samples have been improved through the Regression Analysis. Correlation coefficients of the predictive equations developed in the 95% confidence level have been obtained over $R^2=0,78$. In this study, furthermore, the main effect graphics showing the effects of independent variables on the dimensional accuracy have also been formed and the effects of parameters were evaluated. The most effective parameters on the dimensional accuracy of the cut parts were laser power, cutting feed rate and focus point, respectively.

Keywords: CO₂ Laser Cutting, AISI 304 Steel, Cutting Parameters, Dimensional Accuracy.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Lazer ışınıyla malzeme ile temas olmadan çapaksız kesme yapılabilmektedir. Uygulamadaki bazı avantajları nedeniyle lazerle kesme tekniğinin kullanım oranı ve alanı sürekli artmaktadır. Lazerle kesme yöntemi ile seri üretim yapılabilmekte ve malzeme firesi en aza inmektedir. CNC yazılım programlarıyla, üretim hızı artmakta ve aynı kalınlıkta birçok parça birlikte kesilebilmektedir [1].

Lazerler kullandıkları dalga boylarına, kullanılan aktif maddenin cinsine, enerjinin etkinliğine ve uygulama şekline göre birbirleri arasında farklılık göstermektedirler [2]. Yüksek güç, kısa puls, değişken odak noktası gibi farklı parametreler kullanılarak kesme yapmak parçaların yüksek ölçü tamlığında üretilmesini mümkün kılmaktadır [3]. Lazerle kesme yaparken gerekli enerjinin malzemeye verilmesinde farklı uygulama yöntemleri vardır. İlk önce enerji ışık enerjisi olarak kesilecek iş parçasına gönderilir. Kesilen metaller soğudukça malzeme üzerinde gözle görülebilen veya görülemeyen izler kalır. Bu izlerin bulunduğu bölge "ısıdan etkilenen bölge" olarak adlandırılır [4]. Kesim bölgesinin ön ve yakın çevresindeki ısı etkilerinin bilinmesi lazerle kesme süreçlerinin etkin kontrolü açısından önemlidir [5].

Lazer ışını ile farklı kalınlık ve özellikteki malzemelerin kesilmesi üzerine teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Yılbaş tarafından, 500-1500 W lazer yoğunluğu ve 1-4 cm/s kesme hızı aralığında yapılan lazerle kesme çalışmasında güç, enerji faktörü ve kesme hızında yapılan artışın kesme aralığında %10'luk bir artışa sebep olduğu tespit edilmiştir [6]. Yumuşak demirin CO₂ lazer ile kesilmesinde, odaklama lensleri odak ayarlarının oyuklaşma ve kesme aralığı üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada, kesme aralığı için matematiksel model oluşturulmuş, güç ve odak ayarlarının birbiri ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Güç yoğunluğunun fazla olduğu durumlarda kesme hızının azaltılmasının kesme aralığını belirgin oranda arttırdığı ve kesme aralığı üzerinde kesme hızının etkisinin lazer gücünden daha az olduğu tespit edilmiştir [7]. Çelik plakaların yorulma özellikleri üzerinde geleneksel mekanik kesim ile lazer kesimin etkileri karşılaştırıldığında, lazer kesimden sonraki malzemenin yorulma derecesinin mekanik kesime göre daha yüksek çıktığı görülmüştür [8]. Kaplan tarafından yapılan çalışmada lazer ışınıyla metal kesme için kütle, momentum ve enerji denge denklemlerini içeren matematiksel bir model geliştirilmiştir [9]. Yılbaş tarafından yapılan bir başka çalışmada lazer-metal etkileşiminde sıcaklık ve basınç değişimleri incelenmiş ve lazer ışınmasına maruz kalan bir metalde meydana gelen ısı transferi ısı iletim teorisi ile açıklanmıştır [10]. Çelik levhaların lazer ile

kesiminde ışın bel pozisyonu ve malzeme kalınlığının, kesme aralığı ve oyuk oluşumlarına etkisinin incelendiği çalışmada, ışın bel pozisyonunun kesme aralığını belirgin olarak etkilediği, artan malzeme kalınlığının oyuklaşma derinliğini ve genişliğini arttırdığı tespit edilmiştir [11]. Rajaram ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada 4130 çeliğinin CO₂ lazer ile kesilmesinde lazer gücünün kesme aralığı üzerindeki etkisinin ilerleme miktarından daha fazla olduğu gözlenmiştir. Çalışmada ayrıca, ilerleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı ve lazer gücün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir [12].

Lazer ile kesme işlemi esnasında işlenen malzemede, ışın kalınlığından dolayı, bir kesme aralığı oluşmakta ve bu durum kesilen parçanın ölçü tamlığını etkilemektedir. Diğer taraftan, kesilecek parça üzerinde lazerin takip edeceği yol ve geometride farklı sapmaların oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle, lazerle kesme işleminde istenilen ölçü toleransları içinde kesme yapılabilmesi için en uygun parametrelerin belirlenmesi ve parametre etkilerinin gözlemlenmesi gerekmektedir [13].

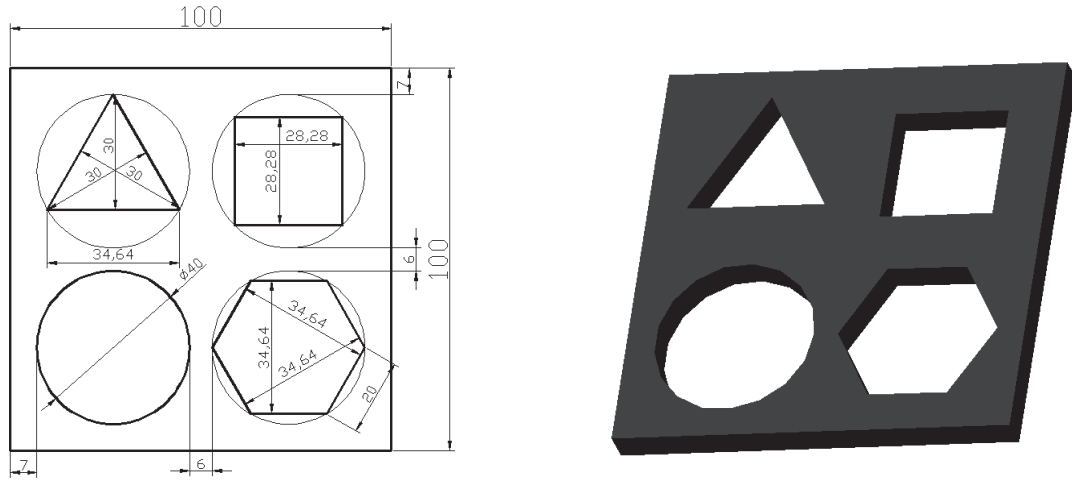
Deneysel tasarım ve tahmini modelleme yöntemleri, harcanan zamanı ve malzemeyi azaltarak kesme parametrelerinin etkilerinin belirlenmesini, bu parametrelerin en uygun şekilde seçilmesini; kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve boyutsal tamlık gibi bağımlı parametrelerin tahmini olarak hesaplanmasını sağlamaktadır [14]. Birçok tahmini modelleme yöntemine göre deney sayısı fazla olmasına rağmen sistematik olması ve parametrelerin etkileşimlerinin etkisini daha iyi yansıtması sebebiyle Tam Faktöriyel deneysel tasarım tekniği (TFT) tercih edilmektedir.

Bu çalışmada AISI 304 çeliğinin CO₂ lazer tezgâhında farklı geometrilerde kesilmesinde kesme parametrelerinin numunelerin boyutsal doğruluğu üzerinde etkileri Tam Faktöriyel deney düzeninde yapılan deneylerle araştırılmış ve deneysel sonuçlar kullanılarak ikinci dereceden tahmini denklemler geliştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Material)

Deneysel çalışmada, endüstride yaygın olarak kullanılan, 4 ve 6 mm kalınlığında, levha şeklindeki AISI 304 paslanmaz çelik malzemelerden Şekil 1'de verilen boyutlarda üçgen, kare, altıgen ve daire kesitli parçalar CO₂ lazer ile kesilmiştir [1]. Bu çalışmada, altıgen şekilli kesimler üzerinden alınan ölçümler çalışmaya dâhil edilmemiştir.



Şekil 1. Lazer tezgâhında kesilen numuneler ve boyutları. (The samples on the cutting CNC laser machine and their dimensions)

Östenitik krom nikelli paslanmaz çelikler, bileşimlerinde %12-25 Cr ve %8-25 Ni içermektedirler ve manyetiklik özellikleri yoktur. Çok iyi kaynak kabiliyetine sahiptirler. Deneylerde kullanılan 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çeliklerinin (ASTM A240-05) sertlikleri ortalama 180 HB30 (Brinell Sertlik Değeri) olup kimyasal kompozisyonları Tablo 1’de verilmiştir

2.2. Metot (Method)

Üç farklı geometriye sahip numunelerin kesilmesinde 4400 W gücündeki Bystronic Byspeed 3015 CO₂ lazer tezgâhı kullanılmıştır. Tezgâhın teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir [15].

CO₂ lazer tezgâhı ile kesme işlemi için kesilecek geometriler ve boyutları belirlendikten sonra, bir sonraki süreçte gerçekleştirilecek olan numuneler

üzerindeki ölçüm işlemleri de göz önünde bulundurularak, sac malzeme üzerine bir yerleşim planı hazırlanmış ve ilgili koordinatlar komut olarak tezgâhın bilgisayarına girilmiştir. 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki saclar üzerinde, üç farklı (kare, üçgen ve dairesel) geometride, değişik kesme şartlarında ve deneysel tasarımdaki deney sırası da gözetilerek kesim yapılmıştır. CO₂ lazer kesme işleminin şematik gösterimi Şekil 2’de gösterilmektedir. Kesme işlemi sırasında CO₂ lazerinin oluşması için kullanılan gaz karışımı %71,7 CO₂ %23,4 (N₂) azot ve kalan kısım helyum (He) gazından oluşmaktadır.

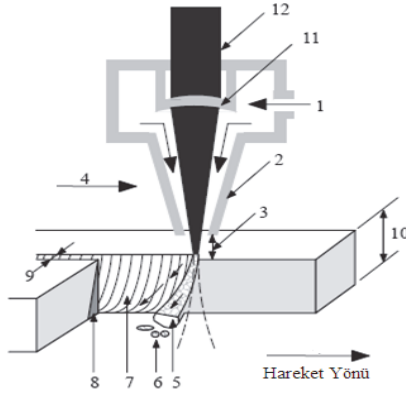
Bu çalışmada, TFT kullanılmıştır. Bir deneyde birden fazla faktörün söz konusu olduğu durumlarda faktöriyel tasarım kullanılmalıdır. Faktöriyel tasarım, her bir faktörün seviyelerinin mümkün olan tüm kombinasyonlarının denemeye tabi tutulmasıdır. TFT

Tablo 1. AISI 304 paslanmaz çeliğinin kimyasal kompozisyonu. (Chemical composition of AISI 304 stainless steel)

Malzeme	Kimyasal Bileşim (% ağırlık)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
AISI 304 (Kalınlık 4 mm)	0,040	0,46	1,67	0,029	0,002	18,3	8,1	0,045
AISI 304 (Kalınlık 6 mm)	0,024	0,37	1,64	0,029	0,003	18,2	8,2	0,035

Tablo 2. CO₂ lazer tezgâhının teknik özellikleri [15]. (Technical properties of CO₂ laser machine)

Tezgâh Parametreleri	Değerler	Tezgâh Parametreleri	Değerler
Osilatör Gücü	4,4 kW	Eksen Hızları	120 m/min
Maksimum İş Parçası Ölçüsü	3000 mm x1500 mm	İvmelenme Değeri	30 m/s ²
X/Y/Z Eksen Hareketleri	3048 mm / 1524 mm / 100 mm	Pozisyonlama Hassasiyeti	±0,1 mm
Dalga Boyu	10,6 µm	Tekrarlama Hassasiyeti	±0,05 mm



1. İşlem gazı
2. Nozul
3. Nozul-yüzey arası boşluk
4. Kesme ilerlemesi
5. Dışarıya akan ergimiş malzeme
6. Dışarıya atılmış malzeme
7. Kesme çizgileri
8. Isı etkisi altında kalan bölge
9. Kesme aralığı
10. Malzeme kalınlığı
11. Odaklama lensi
12. Lazer ışını

Şekil 2. Lazerle kesme işleminin şematik gösterimi. (Schematic presentation of laser cutting process)

en az iki veya daha fazla faktör ve bu faktörlere/parametrelere ait en az iki veya daha fazla seviyenin bulunduğu deneylerde seviyelerin birbirleri ile çarpımından oluşan kombinasyondur [16-18]. TFT istatistiksel yöntemler ile birleştirildiğinde analiz aşamasında araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. TFT deneylerin analizinde Regresyon Analizi kullanılmaktadır. Bu yöntemler yardımı ile bir faktörün deney üzerindeki etkisini hesaplamak mümkündür. Bu yöntemler, işlemlerin sırasında bir değişiklik yapmadan farklılıkların kaynağının belirlenmesine yardımcı olur [17, 18].

Bu deneysel çalışmada, bağımlı parametre olan boyutsal doğruluğun (L) üzerinde bağımsız parametreler; lazer gücü (W), kesme ilerlemesi (F), odak noktası (ON) ve gaz basıncının (P) etkileri araştırılmıştır [1]. Bağımlı parametrelerin seviye ve değerleri Tablo 3'te verilmiştir. TFT kullanılarak, 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çeliği malzeme üzerinde her bir geometrinin kesimi için 81'er adet ($3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$) olmak üzere toplam 486 adet CO₂ lazer kesim yapılmıştır.

Şekil 1'de boyut ölçüleri verilen üçgen, kare ve dairesel geometrilerin ölçülendirilen kısımları DEA marka Koordinat Ölçme Tezgâhında (CMM) ölçülmüştür. Bu tezgâh, servo motorlu, çözünürlüğü $< 0,5 \mu\text{m}$ 'dir. Hassasiyeti $(3,0+L/200) \mu\text{m}$ ($4,0+L/200$) μm 'dir. Tezgâh, 15 her tarafa dönebilen prob başlığına sahiptir [1].

Kesilen üçgen ve kare geometri numuneler üzerindeki boyutların ölçülmesi; CMM tezgâhının

Tablo 3. Bağımsız parametreler ve seviyeleri. (Independent parameters and their levels)

Parametreler	Sembol	Birimi	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Güç	W	Watt	3400	3700	4000
Kesme İlerlemesi	F	mm/min	1000	1100	1200
Odak Noktası	ON	mm	7	7,5	8
Gaz Basıncı	P	bar	14	15	16

prob ucu ile içten köşelere en yakın yerlere dokundurularak yapılmıştır. Numune üzerinden alınan koordinat değerleri tezgâhın bilgisayar programına aktarılmış ve programda koordinat noktaları üzerinden çizgiler geçirilerek üçgen ve kare şekiller oluşturulmuştur. Bu şekillerden karşılıklı kenar uzaklıkları ölçülerek bilgisayara kaydedilmiştir. Daire ölçümünde ise prob uç içten 26 noktaya dokundurulmuş, bilgisayar ortamında bu noktalardan geçen bir daire çizdirilmiştir. Bu dairenin çapı, ölçülen numunedeki dairenin çapı olarak belirlenmiştir. Ölçme sonuçları bilgisayarda kayıt altında tutularak her şeklin ölçme sonucunun kendi içinde ortalaması alınmıştır [1].

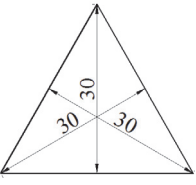
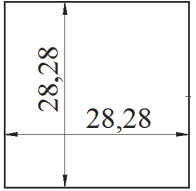
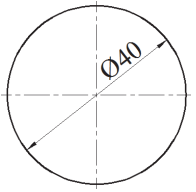
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Deneysel çalışma sonucu elde edilen boyut ölçüleri MİNİTAB 16.0 istatistik paket programında işlenerek bağımlı ve bağımsız parametreler arasındaki ilişkileri yansıtan, içerisinde bağımsız parametrelerin ana etkilerinin yanı sıra karelerinin etkileri ve parametre etkileşimlerinin etkisini de barındıran ikinci dereceden tahmini denklemler geliştirilmiştir.

3.1. Boyutsal Doğruluk Tahminsel Denklemleri (Predictive Equations for Dimensional Accuracy)

Deneysel çalışmada, 4 ve 6 mm kalınlıktaki üç farklı geometrinin lazer ile kesiminde, TFT sistemi takip edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerle, bağımlı parametre (çıkış parametresi) olan boyutsal doğruluk (L) için kesme parametrelerinin ana

Tablo 4. Üç farklı geometrik şekilde kesilen AISI 304 çeliği için teorik boyut ölçülerini veren tahmini denklemler (Predictive equations providing dimensions of sizes for cutting three different geometric shapes)

Geometrik Şekil	Malzeme Kalınlığı	Tahminsel Denklem	Korelasyon Katsayısı
	4 mm	$L4_{\text{Üçgen}} = 27,8 + (0,00101 * W) - (0,00306 * F) + (0,139 * ON) + (0,222 * P) - (0,000000 * W^2) + (0,000001 * F^2) - (0,0075 * ON^2) - (0,00548 * P^2) - (0,000034 * W * ON) - (0,000014 * W * P) + (0,000154 * F * ON) + (0,000014 * F * P) - (0,00194 * ON * P)$	R ² =0,823
	6 mm	$L6_{\text{Üçgen}} = 50,6 - (0,00519 * W) - (0,00685 * F) - (1,40 * ON) - (0,229 * P) + (0,000000 * W^2) + (0,000006 * F^2) + (0,0147 * ON^2) + (0,0067 * P^2) + (0,000398 * W * ON) + (0,000030 * W * P) - (0,000550 * F * ON) - (0,000197 * F * P) + (0,0219 * ON * P)$	R ² =0,782
	4 mm	$L4_{\text{Kare}} = 26,4 + (0,00143 * W) - (0,00612 * F) + (1,28 * ON) - (0,284 * P) - (0,000000 * W^2) + (0,000002 * F^2) - (0,0784 * ON^2) + (0,00963 * P^2) - (0,000003 * W * ON) - (0,000014 * W * P) + (0,000058 * F * ON) + (0,000111 * F * P) - (0,009 * ON * P)$	R ² =0,894
	6 mm	$L6_{\text{Kare}} = 51,3 - (0,00519 * W) - (0,00147 * F) - (1,83 * ON) - (0,76 * P) + (0,000001 * W^2) + (0,000000 * F^2) + (0,0055 * ON^2) + (0,0119 * P^2) - (0,000001 * W * F) + (0,000234 * W * ON) - (0,000000 * W * P) - (0,000147 * F * ON) - (0,000058 * F * P) + (0,0689 * ON * P)$	R ² =0,785
	4 mm	$L4_{\text{Daire}} = 42,2 - (0,0015 * W) - (0,00349 * F) + (0,207 * ON) + (0,208 * P) + (0,000000 * W^2) + (0,000000 * F^2) - (0,0268 * ON^2) - (0,00354 * P^2) + (0,000008 * W * ON) - (0,000033 * W * P) + (0,00002 * F * ON) - (0,00004 * F * P) + (0,0102 * ON * P)$	R ² =0,885
	6 mm	$L6_{\text{Daire}} = 64 - (0,0057 * W) - (0,0073 * F) - (2,26 * ON) - (0,148 * P) + (0,000001 * W^2) + (0,000005 * F^2) + (0,0423 * ON^2) - (0,00215 * P^2) - (0,000001 * W * F) + (0,00028 * W * ON) + (0,000003 * W * P) + (0,000049 * V * ON) - (0,000056 * F * P) + (0,0383 * ON * P)$	R ² =0,877

etkileri ile karelerinin ve birbirleriyle doğrusal etkileşimlerinin sonucunda oluşan, %95 anlamlılık seviyesinde, ikinci dereceden tahmini denklemler geliştirilmiştir. Tablo 4'te sunulan ikinci dereceden lineer regresyon denklemlerinden oluşan tahmini modellerin korelasyon katsayıları (R²) incelendiğinde en düşük değer 0,782 olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayılarının yüksek olması geliştirilen denklemlerin geçerliliğini yansıtmaktadır.

3.2. Ana Etki Grafikleri (Main Effect Graphs)

Ana etki grafikleri, çıkış parametresi olan bağımlı değişkenin, giriş parametreleri olan bağımsız değişkenleri farklı seviyelerinde ne şekilde etkilendiğini gösteren grafiklerdir. Doğrusal kesimlerde kenarların doğruluğu, köşeler ve kesilen profillerin boyutsal doğruluklarının korunması oldukça önemlidir. Doğrusal kesimlerde daha iyi doğrusal ve boyutsal tamlik lazer ışını yoluyla elde edilen yüksek enerji yoğunluğu ile ilgilidir [19].

Yüksek enerji yoğunluğu kesim aralığını ve boyutsal doğruluğu etkilemektedir. Artan kesim aralığı ile kesilen geometrilerin ölçüleri anma ölçüsünden pozitif (+) yönde sapmakta yani daha büyük

değerlerde ölçümler elde edilmektedir. 4 ve 6 mm kalınlığındaki sac malzemeler üzerinden üçgen geometrili profillerin istenilen ölçülerde kesilmesinde giriş parametrelerinin ölçme sonuçları üzerine etkileri Şekil 3a ve Şekil 3b'de verilmiştir. Şekil 3a'da dikkati çeken ilk parametre en geniş ölçme sonucu aralığını kapsamıyla odak noktasıdır. Odak noktası değerinin artışı üçgen geometrili kesilen numunelerin ölçüm değerleri 30 mm anma ölçüsünden + yönde sapma göstermiştir. Odak noktası düşük değerlerde olduğunda lazer ışınlarının odaklanılan düzlemde yani iş parçasının üst yüzeyinden sapması da düşük olmaktadır [20]. Odak noktası değerleri arttırıldığında ışınlar daha geniş bir alana dağılmaktadır. Bu durumda, kesim aralık değerleri artmakta ve nominal ölçüden uzaklaşmaktadır.

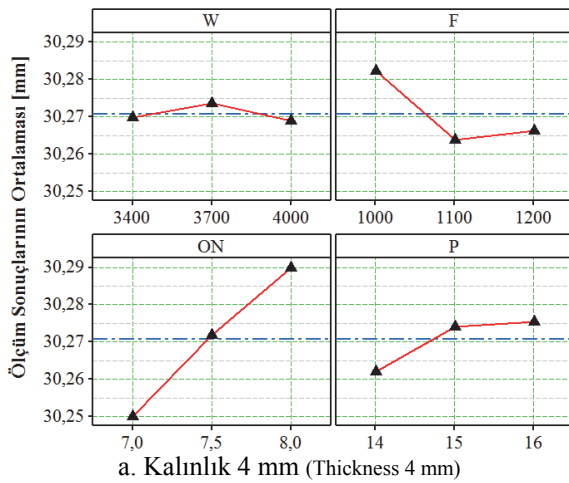
Kesme ilerlemesinin 1000 mm/min'den 1100 mm/min'e yükseltilmesiyle nominal ölçünün üzerindeki değerlerden nominal ölçü değerlerine doğru düşüş gerçekleşmekte iken 1100 mm/min ilerleme değerinden sonra özellikle 4 mm kalınlığındaki malzemenin kesilmesinde ölçü değerlerinde belirgin bir değişim olmamaktadır (Şekil 3a). Dolayısıyla 1100 mm/min, 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerin üçgen kesimi için

optimum kesme ilerlemesi değeridir. Kesme ilerlemesinin düşük değerlerinde iş parçası malzemesi zamana bağlı olarak daha fazla lazer ışınına maruz kaldığından daha yüksek ısı transferi nedeniyle kesim aralığı artmakta ve nominal ölçüden uzaklaşmaktadır [21].

Gaz basıncının artışına bağlı olarak nominal ölçü 30 mm'den + yönde sapmalar oluşmuş iken bu sapmalar 6 mm kalınlığındaki malzemenin kesilmesinde daha da artmıştır (Şekil 3a ve 3b). Düşük gaz basıncı kesilen yüzeylerde daha düşük çizgi derinliklerinin (Şekil 2) oluşmasına neden olmuştur. Kesilen yüzey üzerinde oluşan ince çizgi ve çizikler (Şekil 2) lazerle kesmenin kalitesini etkileyen önemli bir unsur olup lazerle kesilmiş parçanın yüzey pürüzlülüğünü, görüntüsünü ve boyutsal doğruluğunu etkilemektedir [20]. Diğer taraftan, gaz basıncı düşük olduğunda iş parçası üzerinden kaldırılan malzeme miktarı da düşük olmaktadır. Bu nedenle, artan gaz basıncına bağlı olarak anma ölçüsü 30 mm'den + yöndeki sapmalar artarak boyutsal doğruluk azalmıştır.

Lazer gücü de kesilen iş parçalarının boyutsal doğruluğunu etkileyen önemli bir faktördür. Lazer gücü ile birlikte lazer ışınının gücü de artmaktadır. Dolayısıyla iş parçası malzemesi kolay ergiyerek daha kolay kesilebilecektir. Ancak lazer gücünün optimal değerinin seçilmesi gerekir. Lazer gücü değerinin optimal değerlerden yüksek seçilmesi ısıl olarak etkilenen bölgenin alanını arttıracaktır. Lamikiz ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada yüksek dayanımlı çeliklerin CO₂ lazer ile kesiminde lazer gücünün artışına bağlı olarak kesim aralığı değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, yüksek değerlerdeki lazer gücünün çelik levhaya yüksek ısı transferi nedeniyle daha fazla malzeme eritilmesine atfedilmiştir [21].

4 ve 6 mm kalınlıktaki AISI 304 paslanmaz çeliğin kesilmesinde boyutsal doğruluk açısından optimum

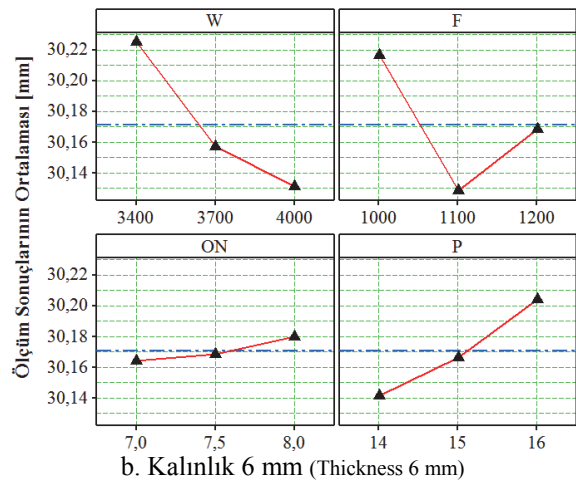


lazer gücünün 4000 W olduğu Şekil 3a ve 3b'de görülmektedir. Özellikle 6 mm kalınlığındaki iş parçasının kesilmesinde boyutsal doğruluk üzerinde en etkili parametre olarak lazer gücü tespit edilmiştir (Şekil 3b). St37 çeliğin lazerle kesilmesinde de lazer gücünün kesme hızından daha etkili olduğu tespit edilmiştir [22].

4 mm kalınlığındaki sac malzemenin anma ölçüsü 28,28 mm olan kare şeklinde kesilmesinde ölçme sonuçları üzerinde bağımsız parametrelerin etkileri Şekil 4a'da verilmiştir. Odak noktasının en düşük (7 mm) değerinden orta değerine (7,5 mm) artışla ölçüm değerlerinde hızlı bir yükselme görülmekte ve boyutsal doğruluk bozulmaktadır. Bu değerden sonra ise anma ölçüsü değerlerinde düşme olmakta ve boyutsal doğruluk iyileşmektedir. Odak noktası değerleri arttırıldığında ışınlar daha geniş bir yüzey alanına dağılmaktadır. Bu durumda kesim aralık değerlerinin artması sonucu nominal ölçüden uzaklaşmaktadır [20]. Dolayısıyla 4 mm kalınlığındaki AISI 304 malzemenin kesilmesinde anma ölçüsünden sapmanın engellenerek boyutsal doğruluğun sağlanması için optimal odak noktası değerinin 7 mm olduğu söylenebilir.

6 mm kalınlığındaki AISI 304 malzemesinin kesilmesinde odak noktasının boyutsal doğruluk üzerinde anlamlı etkisi görülmemekle birlikte, artan odak noktası değerleri ile anma ölçüsünden sapmalar daha düşük değerlerde elde edilmiştir (Şekil 4b). Kare geometrili lazer kesimlerdeki kesme ilerlemesinin boyutsal tamlık üzerindeki etkisi üçgen geometrili kesimlerdeki etki ile benzer eğilimdedir (Şekil 3.b, Şekil 4b). Kesme ilerlemesinin düşük değerlerinde kesim aralığı artmakta ve nominal ölçüden uzaklaşmaktadır [21].

Düşük kesme ilerlemesi değerlerinde kesilen yüzey üzerinde ince çizgi ve çizikler oluşmaktadır (Şekil 2). Kesme ilerlemesi arttırıldığında ve gaz basıncı



Şekil 3. Üçgen geometrik şekilli lazer kesim için ana etki grafikleri (The main effect graphs for triangular geometric shaped CO₂ laser cutting)

düşürüldüğünde bu ince çizgiler sıg hale gelmekte ve kesme aralığındaki sapmalar daha düşük değerlerde olmaktadır [20]. Kesme ilerlemesinin 1100 mm/min'den 1200 mm/min'e yükseltilmesiyle yine nominal ölçüden + yönde sapmalar oluşmaktadır. Dolayısıyla 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerin kare geometri kesimlerinde de anma ölçüsünden minimum sapma ve boyutsal doğruluk için 1100 mm/min kesme ilerlemesinin optimum değer olduğu söylenebilir. Geometrik ve ölçüsel tamlik kesim aralığının azaltılması ve kontrol altına alınmasıyla iyileştirilebilmektedir.

Kesim aralığının kontrolü için gaz basıncı, yansıtma ve termal iletkenlik özelliği yüksek olan malzemelerde önemli bir faktördür [23]. Gaz basıncının artması ile birlikte kare profilin 28,28 mm anma ölçüsünden + yönde sapmaların olduğu Şekil 4.a ve b'den görülmektedir. Aynı eğilim 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerin üçgen profilli olarak kesiminde de elde edilmiştir (Şekil 3a ve 3b). 2 mm kalınlığındaki östenitik paslanmaz çeliğin kesilmesinde de kesim aralığı gaz basıncı ile artmış ve durum artan gaz basıncı ile ergimiş malzemenin kesim aralığından tamamıyla kaldırılabilmesine atfedilmiştir [13]. Rao ve Yadava tarafından yapılan çalışmada süperalaşım levhaların düz ve eğrisel geometride kesilmesinde kesme aralığı üzerinde kesme ilerleme hızı gaz basıncından daha etkili bulunmuş iken 0,7 mm kalınlığındaki nikel esaslı süperalaşım levhanın kesilmesinde gaz basıncı kesme ilerlemesinden daha etkili olmuştur [24, 25].

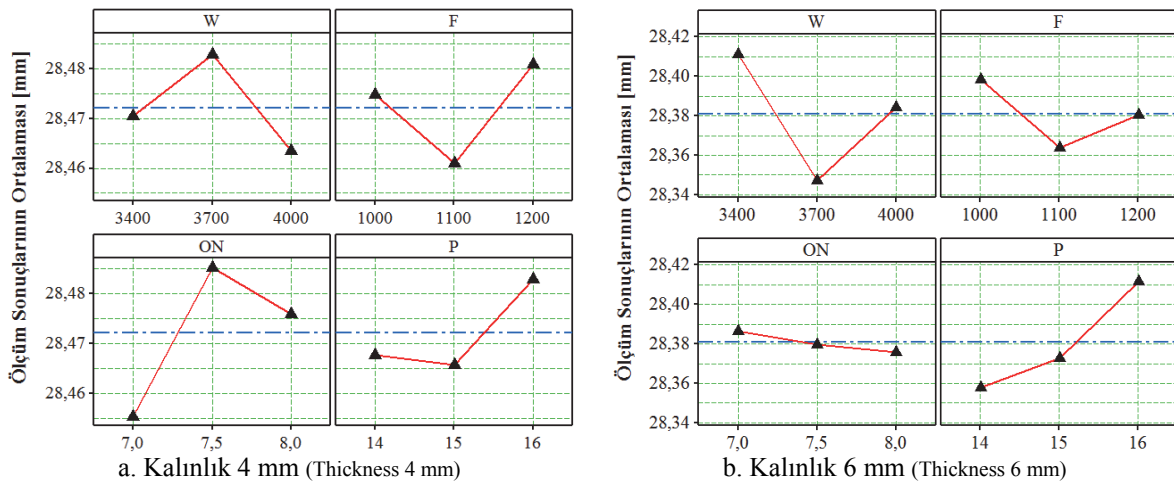
Östenitik paslanmaz çeliğin kesilmesinde kesme ilerleme hızı kesme aralığı üzerinde en etkili parametre olarak belirlenmiştir [13]. Farklı kalınlıklardaki kare geometri profillerin kesilmesinde lazer gücünün değişimine bağlı olarak nominal ölçüden sapmaların aynı eğilimde olmadığı görülmektedir. 4 mm kalınlığındaki malzemelerin kesilmesinde lazer gücünün 3400 W'den 3700 W'ye yükseltilmesiyle anma ölçüsü değerleri artmış iken 6

mm kalınlığındaki malzemelerin kesilmesinde azalmıştır (Şekil 4.a ve b). Yine, 6 mm kalınlığındaki malzemenin kesilmesinde lazer gücünün artmasına bağlı olarak ölçümler 28,35-28,41 mm aralığında sapmalar göstermekte iken 4 mm kalınlığındaki malzemenin kesilmesinde ölçme sonuçları 28,46-28,48 mm aralığında değişmiştir. Östenitik paslanmaz çeliğin kesilmesinde boyutsal tamlığı etkileyen kesim aralığı değerleri lazer gücü değerlerinin artırılmasıyla artmıştır [13].

4 mm ve 6 mm AISI 304 malzeme üzerinden kare geometri profillerin kesiminde, nominal değerden minimum sapma ve ölçüsel tamlik için lazer gücünün optimum değerleri sırasıyla 3400 W ve 3700 W'dir. St37 çeliğin kesilmesinde lazer gücünün kesme ilerlemesi hızından daha etkili olduğu tespit edilmiştir [22]. Bu çalışmada da 6 mm kalınlığındaki parçaların kesilmesinde lazer gücünün ilerleme hızından daha etkili olduğu görülmüştür.

Kavisli kenarların kesiminde ışın yörüngesinin lokalize etkileri; ışın enerji dağılımının asimetrisi, malzemenin lokalize hacimli ısıtmaya maruz kalmış olması ve dönme merkezine yakınsak ısı iletimi olduğundan dolayı düz bir kesime göre farklılıklar gösterebilmektedir. Bu etkiler geometrik değişikliklere neden olmaktadır [26]. Şekil 5a'da 4 mm kalınlığındaki AISI 304 paslanmaz çeliğin CO₂ lazerle kesilmesinde bağımsız parametrelerin dairesel şekilli kesimin ölçme sonuçlarına etkileri gösterilmiştir.

Odak noktasının boyutsal tamlik üzerindeki etkisi üçgen kesimle benzer eğilimdedir. 6 mm kalınlığındaki parçanın dairesel kesiminde odak noktası değerinin artmasına bağlı olarak nominal ölçüden + yönde uzaklaşmıştır (Şekil 5b). Diğer taraftan, 4 mm kalınlığındaki AISI 304 malzemenin kesilmesinde de optimal odak noktası değerinin 7 mm olduğu söylenebilir. Odak noktası değeri 7,5 mm'ye artırıldığında ışınlar daha geniş bir yüzey alanına



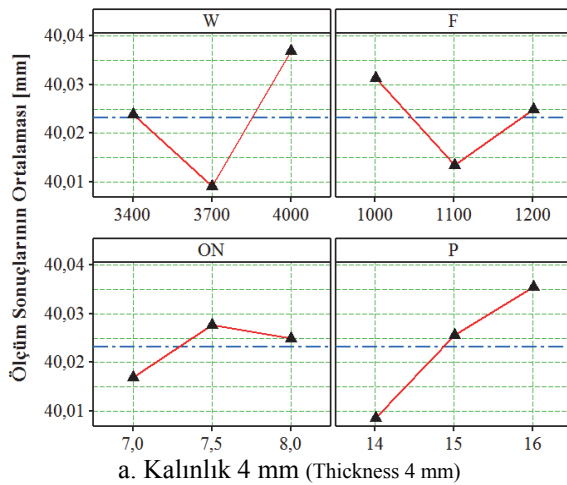
Şekil 4. Kare geometrik şekilli kesim için ana etki grafikleri (The main effect graphs for square geometric shaped CO₂ laser cutting)

dağıldığından kesim aralık değerlerinin artması sonucu nominal ölçüden + yönde uzaklaşmıştır (Şekil 5a) [20].

Dairesel şekilli kesmede, kesme ilerlemesinin boyutsal tamlık üzerine etkisi üçgen ve kare kesimle aynı eğilimde olup 1100 mm/min kesme ilerlemesinin optimal değer olduğu söylenebilir. Kesme ilerlemesi arttıkça ısı etkilenen bölgenin genişliği azalmaktadır. İş parçası ergiyerek kesilmektedir. İlerlemenin artışıyla birlikte lazer ışını kesme yolu boyunca iş parçası malzemesinin üzerindeki her bir noktada daha hızlı hareket edeceği için lazer ısı daha az etkili olacaktır. Dolayısıyla ısı olarak etkilenen bölge daha az ve kesme genişliği daha düşük değer olacaktır. Bu durum, kesilen geometrinin boyutsal tamlığını etkileyecektir [27]. Kesme ilerlemesinin 1100 mm/min'den 1200 mm/min'e yükseltilmesiyle kesim aralığının artması sonucu oluşan nominal ölçüden sapmaların sebebi ise, kesilen yüzeyler üzerindeki kesim aralığını azaltan sığ çizgi ve çiziklerin diğer parametrelerin etkileşimleri ile tekrar belirginleşmesine atfedilebilir [20].

Kare ve üçgen profilli kesimlerde olduğu gibi gaz basıncının artması ile birlikte kesim aralığı arttığından dairesel profilin anma ölçüsünden + yönde sapmalar olmuştur (Şekil 5) [13, 25]. Düşük gaz basıncında kesme yüzeyinde oluşan çizgilerin derinlikleri ve malzeme kaldırma oranı düşük olmaktadır. Gaz basıncı iş parçasından talaş kaldırmak için itici bir güçtür [20].

Lazer gücü, lazer ışınının gücünü temsil etmekte olup lazer gücü arttıkça ısı olarak etkilenen bölgenin genişliği de artmaktadır. 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerin kesilmesinde 3700 W lazer gücü boyutsal tamlığın sağlanması ve anma ölçüsünden minimum sapma için optimal değerdir. Daha düşük lazer gücünde (3400 W) etkin olmayan ısı oluşumu nedeniyle kaliteli ve verimli bir kesme işleminin oluşmadığı düşünülmektedir. Lazer



a. Kalınlık 4 mm (Thickness 4 mm)

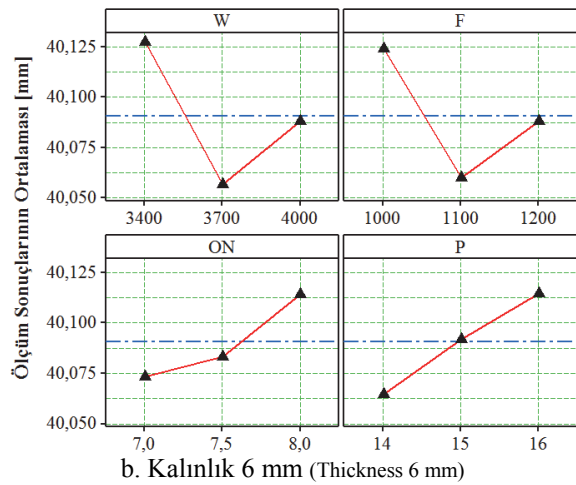
gücünün optimum değerine (4000 W) artırılması ile iş parçası üzerinde ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin artması ve iş parçasının kolay ergiyerek kesim aralığının artması sonucu nominal bölgeden + yönde sapmalar meydana gelmiştir [27].

3.3. Boyutsal Doğruluk Üzerine Kesme Parametrelerinin Etkileri (The Effects of Cutting Parameters on Dimensional Accuracy)

Şekil 6'da iki farklı kalınlıkta, üçgen, kare ve dairesel kesilen parçaların; belirlenen nominal ölçüleri, kesilmiş parçalar üzerinde yapılan ölçme sonucu elde edilmiş ölçüm aralıkları ve bu değerleri kesme parametrelerinin ne şekilde etkilediği gösterilmektedir. Şekil oluşturulurken kesme parametrelerinin etkilerini göstermek için Şekil 3-6'da verilen grafikleri oluşturan sayısal veriler kullanılmış ve parametrelerin sadece birinci ve üçüncü seviyeleri dikkate alınmıştır.

Bu deneysel çalışmada ele alınan tüm geometriler dikkate alınarak 6 mm kalınlığındaki sac malzemenin lazer ile kesilmesinde kesme parametrelerinin etkileri değerlendirildiğinde; W ve F değerlerinin artırılmasıyla nominal ölçüye yakın değerler elde edilmekte, ON ve P değerlerinin artırılmasıyla nominal ölçüden uzaklaşmaktadır (Şekil 6a-c). ON ve P parametrelerinin bu etkileri 4 mm sac malzemenin kesilmesinde de aynıdır. 4 mm kalınlığındaki üçgen ve kare profillerin kesiminde nominal ölçüden uzaklaşmakta iken 6 mm kalınlığındaki sac malzemenin kesiminde nominal ölçüye daha yakın değerler elde edilmiştir. Yani; sac kalınlığı arttıkça nominal ölçüye yakın değerler elde edilmektedir (Şekil 6a-b).

Dairesel şekilli lazer kesimde ise bu durum tam tersi olarak gerçekleşmiştir (Şekil 6.c). Nominal ölçüye en yakın değerler 4 mm kalınlığındaki dairesel şeklin kesilmesinde elde edilmiştir (Şekil 6c). Üç farklı profilin kesiminde de elde edilen boyut ölçüleri



b. Kalınlık 6 mm (Thickness 6 mm)

Şekil 5. Dairesel geometrik şekilli kesim için ana etki grafikleri (The main effect graphs for circular geometric shaped CO₂ laser cutting)

değerlendirildiğinde; 6 mm kalınlığındaki sac malzemeler kesilirken ölçme sonuçları arasındaki aralık 4 mm kalınlığındaki sac malzemenin kesiminde elde edilen sonuçların aralığından fazladır. Yani; 6 mm sac malzeme kesilirken nominal ölçüye daha yakın değerler elde edilmekte, ancak bu kesilen boyutlar ölçüldüğünde geometri fark etmeksizin boyut ölçme değerleri arasındaki fark fazla çıkmaktadır (Şekil 6a-c). İki farklı kalınlıktaki sac malzemenin kesilmesinde her bir kesilen boyutun ölçme sonuçları arasındaki farklar 0,1 mm'den düşük çıkmıştır. Bu durum lazer kesme işleminde kesim hassasiyetini göstermektedir.

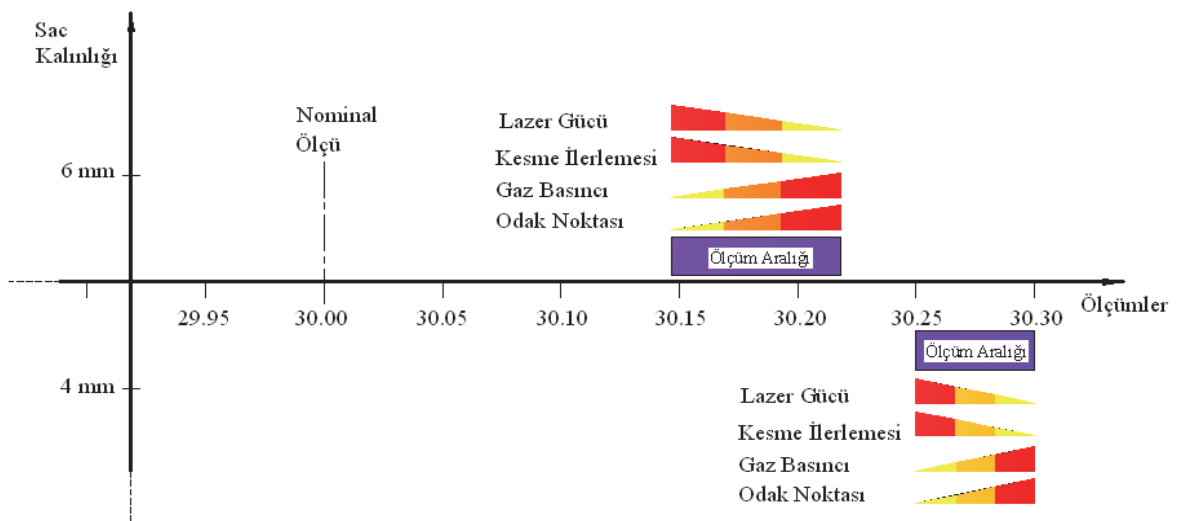
4 mm kalınlığındaki sac malzemelerden Şekil 1'de verilen boyutlarda üçgen numuneler kesildiğinde; ölçüm boyu (nominal ölçü) olan L=30 mm değerinden +0,25 mm □ +0,29 mm aşılarak daha büyük boyutta parçalar elde edilmektedir. 6 mm kalınlığındaki sac malzemeler üçgen şeklinde kesildiğinde ise nominal ölçü +0,14 mm □ +0,22 mm aralığında büyük çıkmaktadır (Şekil 6a). Buradan; parça kalınlığı arttıkça nominal ölçüye daha yakın değerler elde edileceği anlaşılmaktadır. 4 ve 6 mm kalınlıklarındaki sac malzemenin kesilmesinde W ve F'nin artan değerlerinde nominal ölçüye yakın değerler elde edilirken, P ve ON değerleri arttırıldığında nominal ölçüden + yönde uzaklaşmaktadır.

Kare şekilli kesim için sac malzeme kalınlığına bağlı olarak kesme parametrelerinin etkileri ayrı ayrı değerlendirildiğinde; W'nin azaltılması ve P'nin arttırılmasıyla nominal ölçüden uzaklaşmaktadır (Şekil 6b). Diğer taraftan, 4 ve 6 mm kalınlıktaki sacdan aynı profilin kesilmesinde diğer kesme parametreleri tutarlı bir etki sergilememiştir. Şekil 6c incelendiğinde, nominal ölçüden sapma 4 mm sac malzemenin kesilmesinde 0,05 mm'den az çıkmıştır.

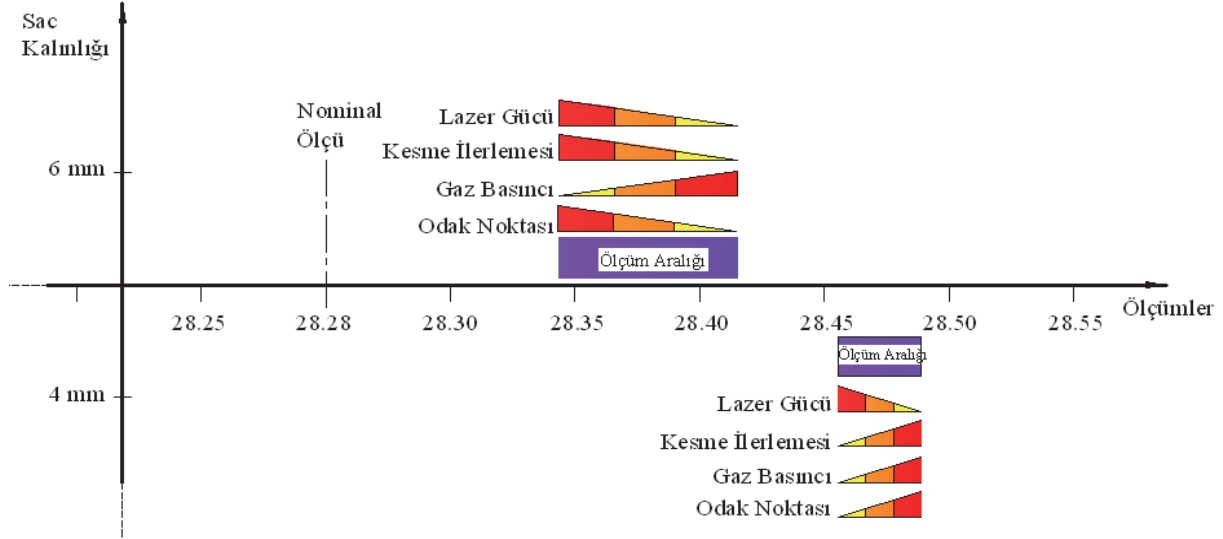
4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

CO₂ lazerle kesmede kesme parametreleri; kesim aralığını, kesme verimliliğini ve yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Kesim aralığının artmasına bağlı olarak kesilen geometrilerin anma ölçülerinden sapmalar olmakta ve geometrilerin boyutsal doğruluğu azalmaktadır. Bu çalışmada, 4 ve 6 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çeliğin CO₂ lazer ile üç farklı geometrilerde kesilmesinde, lazer gücü, kesme ilerlemesi, odak noktası ve gaz basıncının boyutsal doğruluk üzerine etkilerini içeren ikinci dereceden tahmini denklemler geliştirilmiştir. Kesme parametrelerinin etkileri kesme aralığı ile boyutsal doğruluk ilişkilendirilerek araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şunlardır:

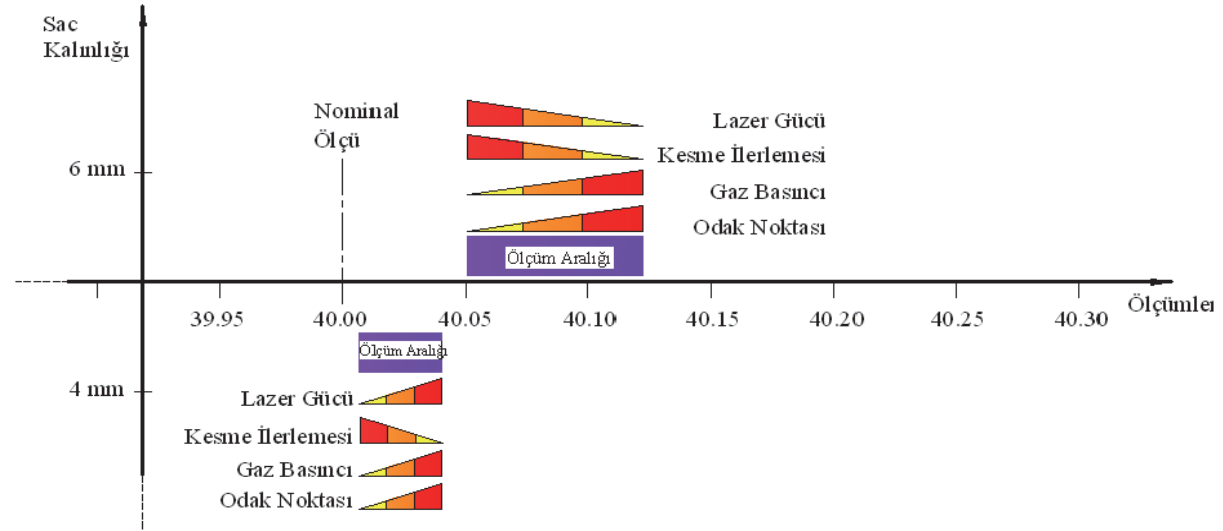
1. Korelasyon katsayıları (R^2) 0,782'nin üzerinde olduğundan %95 anlamlılık seviyesinde, güvenilir ve geçerli teorik tahminsel sonuçlar elde etmek için geliştirilen ikinci dereceden denklemler kullanılabilir.
2. AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin kalınlığı arttıkça anma ölçülerine daha yakın kesimler yapılmış ve daha yüksek boyutsal doğruluk elde edilmiştir.
3. Nominal ölçüden sapma en düşük değerlerde olduğundan en yüksek boyutsal doğruluk dairesel geometri kesimlerinde elde edilmiştir.
4. Odak noktası değerinin artışı ile 4 ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerden üçgen, 6 mm kalınlığındaki malzemenin kare ve dairesel geometri kesilen numunelerin ölçme değerleri anma ölçülerinden + yönde saparak boyutsal doğruluk azalmıştır. 4 mm kalınlığındaki AISI 304 malzemenin kare ve dairesel profilli kesilmesinde optimal odak noktası değeri 7 mm'dir.



a. Üçgen Geometrik Şekilli CO₂ Lazer Kesim (Triangular geometric shaped CO₂ laser cutting)



b. Kare Geometrik Şekilli CO₂ Lazer Kesim (Square geometric shaped CO₂ laser cutting)



c. Dairesel Geometrik Şekilli CO₂ Lazer Kesim (Circular geometric shaped CO₂ laser cutting)

Şekil 6. Kesme parametrelerinin boyutsal doğruluk üzerindeki etkileri (The effects of cutting parameters on dimensional accuracy)

5. AISI 304 paslanmaz çeliğinin üçgen, kare ve dairesel şekilli olmak üzere farklı geometrilere kesilmesinde kesme ilerlemesinin boyutsal doğruluk üzerine etkileri benzer eğilimdedir. 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki malzemelerin kesiminde optimum kesme ilerlemesi değeri 1100 mm/min'dir.

6. İki farklı kalınlıktaki AISI 304 paslanmaz çeliğinin üçgen, kare ve dairesel şekilli olmak üzere farklı geometrilere kesilmesinde gaz basıncının artışına bağlı olarak anma ölçülerden + yöndeki sapmalar nedeniyle boyutsal doğruluk azalmıştır. CO₂ lazer ile paslanmaz çeliğin kesilmesinde boyutsal doğruluğun sağlanması için gaz basıncı azaltılmalıdır

7. 14 Bar gaz basıncı AISI 304 çeliğinin kesilmesinde optimal değerdir.

8. AISI 304 paslanmaz çeliğinin üç farklı geometrik şekilde kesilmesinde lazer gücü boyutsal doğruluk üzerinde farklı etkiler yaratmıştır. Üçgen, kare ve dairesel şekilli kesimler için optimum lazer gücü sırasıyla 4000 Watt, 3700 Watt ve 3700 Watt'tır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmada, numunelerin lazerle kesiminde desteklerini esirgemeyen LAZER POWER A.Ş.'ye, kesilen numunelerin CMM'de ölçülmesi imkânını sağlayan MEGA TEKNİK'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Durukan, Z., "Lazer ile Kesmede İş ve İşleme Parametrelerinin Geometrik ve Boyut Değişimlerine Etkilerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 122-171, 2010.
2. Cemal, M., "Lazer ile Kesme ve Endüstriyel Uygulamaları" Yüksek Lisans Tezi, **Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Antakya, 32-37, 2006.
3. Vatsya, S. R., Bordatchev, E. V. ve Nikumb, S. K., "Geometrical Modeling of Surface Profile Formation During Laser Ablation of Materials", **Journal of Applied Physics**, Cilt 93, No 12, 9753-9759, 2003.
4. <http://www.konlazer.com.tr/main.swf>, 2010.
5. Grum, J. ve Zuljan, D., "Frequency Analyses of A Signal of Irradiation From the Cutting Front and Surface Profile Height in Laser Cutting of Austenite Stainless Steel", **Lasers in Engineering**, Cilt 12, No, 59-80, 2002.
6. Yilbas, B. S., "Effect of Process Parameters on the Kerf Width during the Laser Cutting Process", **Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Eng. Manuf.**, Cilt 215, 1357-1365, 2001.
7. Uslan, İ., "CO₂ Laser Cutting: Kerf Width Variation During Cutting", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers B, Journal of Engineering Manufacture**, Cilt 219, No B18, 571-577, 2005.
8. Meurling, F., Melander, A., Linder, J. ve Larsson, M., "The Influence of Mechanical and Laser Cutting on the Fatigue Strengths of Carbon and Stainless Sheet Steels", **Scandinavian Journal of Metallurgy**, Cilt 30, No 5, 309-319, 2001.
9. Kaplan, A. F. H., "An Analytical Model of Metal Cutting with A Laser Beam", **Journal of Applied Physics**, Cilt 79, No 5, 2198-2208, 1996.
10. Yilbas, B. S., "Laser Cutting Quality Assessment and Thermal Efficiency Analysis", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 155-156, 2106-2115, 2004.
11. Karataş, Ç., Keleş, Ö., Uslan, İ. ve Usta, Y., "Laser Cutting of Steel Sheets: Influence of Workpiece Thickness and Beam Waist Position on Kerf Size and Stria Formation", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 172, 22-29, 2006.
12. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J. ve Cheraghi, S. H., "CO₂ Laser Cut Quality of 4130 Steel", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 43, No 4, 351-358, 2003.
13. Eltawahni, H.A., Hagino, M., Benyounis, K.Y., Inoue, T. ve Olabi, A.G. "Effect of CO₂ Laser Cutting Process Parameters on Edge Quality and Operating Cost of AISI316L", **Optics and Laser Technology**, Cilt 44, 1068-1082, 2012.
14. Motorcu, A. R., "Determination of the Parameters Providing Optimum Tool Life by Taguchi Technique and Observation of Tool Wear in the Machining of AISI1050 and AISI4140 Steels with the Ceramic Cutting Tools", **Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 24, No 4, 699-708, 2009.
15. Bystronic Lazer AG, **Byspeed Kullanma Kılavuzu**, İsviçre, 229-231, 2002.
16. Akman, G. ve Özkan, C., "Sac İmalatında Karşılaşılan Yapışma Probleminin Deney Tasarımı ile Çözümü", **Doğuş Üniversitesi Dergisi**, Cilt 12, No 2, 187-199, 2011.
17. Breyfogle, W., **Implementing Six Sigma: Smarter Solutions Using Statistical Methods**, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, ABD, 2003.
18. Lazic, Z.R., **Design of Experiments in Chemical Engineering: A Practical Guide**, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004.
19. Liu, K.W. ve Sheng, P.S., "Dynamic Effects of Circular and Non-Circular Laser Shaping", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 71, No 2, 267-279, 1997.
20. Li, L., Sobih, M. ve Crouse, P.L., "Striation-free Laser Cutting of Mild Steel Sheets", **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, Cilt 56, No 1, 193-196, 2007.
21. Lamikiz, A., López de Lacalle, L.N., Sánchez, J.A., Pozo, D., Etayo, J.M. ve López, J.M., "CO₂ Laser Cutting of Advanced High Strength Steels (AHSS)", **Applied Surface Science**, Cilt 242, No 3-4, 15, 362-368, 2005.
22. Çaydaş, U. ve Hasçalık, A., "Use of the Grey Relational Analysis to Determine Optimum Laser Cutting Parameters with Multi-Performance Characteristics", **Optics and Laser Technology**, Cilt 40, No 7, 987-994, 2008.
23. Pandey, A.K. ve Dubey, A.K., "Taguchi Based Fuzzy Logic Optimization of Multiple Quality Characteristics in Laser Cutting of Duralumin Sheet", **Optics and Lasers in Engineering**, Cilt 50, No 3, 328-335, 2012.
24. Rao, R. ve Yadava, V., "Multi-objective Optimization of Nd:YAG Laser Cutting of Thin Superalloy Sheet Using Grey Relational Analysis with Entropy Measurement", **Optics and Laser Technology**, Cilt 41, 922-930, 2009.
25. Dubey, A.K. ve Yadava, V., "Multi-objective Optimization of Nd:YAG Laser Cutting of Nickel-Based Superalloy Sheet Using Orthogonal Array with Principal Component Analysis", **Optics and Lasers in Engineering**, Cilt 46, 124-132, 2008.
26. Sheng, P.S. ve Cai, P.L., "Predictive Process Planning for Laser Cutting", **Journal of Manufacturing Systems**, Cilt 17, No 2, 144-158, 1998.
27. Sheng, P.S. ve Joshi, V.S., "Analysis of Heat-Affected Zone Formation for Laser Cutting of Stainless Steel", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 53, 879-892, 1995.