



**LAZER İLE KESİM PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIM
YÖNTEMİ İLE EN İYİLENMESİ**

Taha TÜKEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2020

Taha TÜKEL tarafından hazırlanan ‘‘LAZER İLE KESİM PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIM YÖNTEMİ İLE EN İYİLENMESİ’’ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliğı Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

Makina Mühendisliğı Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Bařkan: Doç. Dr. Yusuf Tansel İ

Endüstri Mühendisliğı Ana Bilim Dalı, Bařkent Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

ye: Dr. Öğr. Üyesi Selim TRKBAř

Makina Mühendisliğı Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 20/01/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum

.....

Prof. Dr. Sena YAřYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Taha TÜKEL
20/01/2020

LAZER İLE KESİM PARAMETRELERİNİN DENEY TASARIM YÖNTEMİ İLE EN İYİLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Taha TÜKEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2020

ÖZET

Lazer teknolojisi birçok endüstriyel alanda olduğu gibi imalat sektöründe de çeşitli avantajlar sağlaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel yöntemlerde olduğu gibi lazer ile kesme yönteminde de ürün kalitesine etki eden farklı işlem parametreleri mevcuttur. Parametrelerin doğru seçilmemesi durumunda ürün kalitesi düşerek işlem sonrası ek işlem gereksinimleri ve dolayısıyla ek maliyetler ve zaman kayıpları ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada, 3 farklı kalınlıktaki St-52 malzeme bir fiber lazer tezgahında çeşitli parametrelerin değiştirilmesi ile kesilmiş ve işlem parametrelerinin kesim kalitesi üzerindeki etkileri incelenerek optimum kesme parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Değişken parametreler olarak lazer gücü 3000 W, 3500 W ve 4000 W, kesme hızı 850 mm/dk., 1000 mm/dk. ve 1150 mm/dk., yardımcı gaz basıncı 0,55 bar, 0,65 bar ve 0,75 bar seçilmiştir. Deney tasarım metodlarından birisi olan yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan 3 tekrarlı deney planına göre, belirlenen parametrelerin tek tek değiştirilmesi ile kesme işlemleri yapılmış ve 10cmx5cm boyutlarında 81 adet deney numunesi elde edilmiştir. İşlem sonrasında numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), ortalama pürüz derinliği (Rz), kuadratik ortalama pürüzlülük değeri (Rq), maksimum pürüz derinliği (Rt), yüzey sertliği ve ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü ölçülmüş, parça başı işlem süresi de çıktılar içerisinde değerlendirilerek Minitab paket programı yardımı ile ürün kalitesini eniyileyen optimum parametrelerin bulunması amaçlanmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Lazer ile kesme, Fiber lazer, Deney tasarımı, Yanıt yüzey yöntemi, En iyileme
Sayfa Adedi : 102
Danışman : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

OPTIMIZATION OF LASER CUTTING PARAMETERS BY DESIGN OF EXPERIMENT

(M. Sc. Thesis)

Taha TÜKEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2020

ABSTRACT

Laser technology is widely used in manufacturing industry as well as in many other industrial areas because of its advantages. As with conventional methods, there are different process parameters that affect product quality in laser cutting. If the parameters are not selected correctly, the product quality will decrease, resulting in additional processing requirements and thus additional costs and time losses. In this study, 3 different thickness St-52 materials were cut by changing various parameters on a fiber laser machine and it was aimed to find the optimum cutting parameters by examining the effects of process parameters on cutting quality. Variable parameters were laser power 3000 W, 3500 W and 4000 W, cutting speed 850 mm/min, 1000 mm/min and 1150 mm/min, auxiliary gas pressure 0,55 bar, 0.65 bar and 0.75 bar. Using the response surface method, which is one of the experimental design methods, 3 replicated experimental plans were created. By changing the parameters one by one, cutting operations were performed and 81 test samples with 10cmx5cm dimensions were obtained. After the process, average surface roughness (Ra), average roughness depth (Rz), quadratic average roughness value (Rq), maximum roughness depth (Rt), surface hardness and area size under heat effect were measured and the process time per piece was evaluated in the outputs. With the help of Minitab package program, it is aimed to find the optimum parameters affecting the product quality.

Science Code : 91438

Key Words : Laser cutting, Fiber laser, Design of experiment, Response surface method, Optimization

Page Number : 102

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenmesinde ve çalışmalarımın her aşamasında yardımlarını esirgemeyen, değerli fikir ve katkıları ile çalışmalarına ışık tutan danışman hocam Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL'a,

Deney tasarımı ve analizlerinin yapılması için değerli bilgileri ile beni yönlendiren Doç. Dr. Yusuf Tensel İÇ'e,

Deney numunelerinin ölçüm işlemleri esnasında değerli bilgi ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Arif BALCI'ya,

Lazer tezgahında malzeme kesim işlemlerinin yapılması konusunda yardımcı olan “Yılğenci San. ve Tic. A.Ş.” Üretim Müdürü Serkan KAYAALP ve üretim mühendisi Hüseyin ÇALIŞKAN'a,

Çalışmalarım boyunca daima yanımda olan ve benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Hatice Beyza TÜKEL'e ve aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	3
3. LAZER İLE KESME YÖNTEMİ.....	9
3.1. Lazer ile Kesme Yöntemleri	10
3.1.1. Ergiterek kesme (Fizyon).....	10
3.1.2. Yakarak kesme (Alevli)	10
3.1.3. Arıtarak kesme (Buharlaştırma)	11
3.2. Lazer ile Kesme Yönteminde Etkili Olan Parametreler.....	11
3.2.1. Lazer ışınının gücü.....	12
3.2.2. Kesme hızı.....	12
3.2.3. Odak çapı	14
3.2.4. Odaklama noktası.....	14
3.2.5. Gaz türü.....	15
3.2.6. Gaz basıncı.....	15

Sayfa

3.2.7. Nozül tipi ve çapı	16
3.2.8. Lazer ışını ve nozülün merkezlenmesi	16
3.2.9. İş parçası yüzeyi	16
3.2.10. Lazer ışını dalga boyu	17
3.3. Lazer ile Kesme Yönteminde Kullanılan Gazlar	17
3.3.1. Oksijen gazı.....	17
3.3.2. Argon ve azot gazları	18
3.3.3. Basınçlı hava	18
3.4. Lazer ile Kesme Yönteminin Avantajları.....	18
3.5. Lazer ile Kesim Sonuçlarının Değerlendirilmesi	19
3.5.1. Isıdan etkilenen bölge	19
3.5.2. Cüruf (Çapak) oluşumu.....	19
3.5.3. Kesme bölgesi çizgileri	20
3.5.4. Yüzey pürüzlülüğü	21
3.5.5. Kesme yarığı	21
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1. Deney Tasarımı ve Planı	23
4.1.1. Deney tasarımı	23
4.1.2. Deney planının oluşturulması	24
4.2. Lazer Tezgâhı.....	26
4.3. Deney Malzemesi.....	27
4.4. Deneyin Yapılışı.....	28
4.5. Bulgular.....	29
4.5.1. Yüzey pürüzlülüğü	29

Sayfa

4.5.2. Yüzey sertliği	55
4.5.3. Isıdan etkilenen bölge büyüklüğü	62
4.5.4. İşlem süresi	70
4.5.5. Çapak oluşumu.....	73
4.6. En İyileme	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR	79
EKLER.....	83
EK-1. Ra ölçüm değerleri	84
EK-2. Rq ölçüm değerleri	87
EK-3. Rt ölçüm değerleri.....	90
EK-4. Rz ölçüm değerleri	93
EK-5. Yüzey sertliği ölçüm değerleri	96
EK-6. Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü.....	99
ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Çeşitli lazer güçleri için kesilebilecek malzeme kalınlıkları	12
Çizelge 3.2. 1 mm malzeme için kesme hızları	13
Çizelge 4.1. Deney tasarımında kullanılan parametreler	24
Çizelge 4.2. Deney planı	25
Çizelge 4.3. Durma fiber lazer tezgâh özellikleri	27
Çizelge 4.4. St-52 Malzemenin kimyasal bileşimi	28
Çizelge 4.5. St-52 Malzemenin mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 4.6. Ra ölçüm değerleri.....	32
Çizelge 4.7. Ra değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	33
Çizelge 4.8. Ra değerleri için model özeti	33
Çizelge 4.9. Kuadratik ortalama pürüzlülük değerleri.....	38
Çizelge 4.10. Rq değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	39
Çizelge 4.11. Rq değerleri için model özeti.....	39
Çizelge 4.12. Maksimum pürüz derinliği değerleri	44
Çizelge 4.13. Rt değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları.....	45
Çizelge 4.14. Rt değerleri için model özeti.....	45
Çizelge 4.15. Ortalama pürüz derinliği değerleri.....	50
Çizelge 4.16. Rz değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	51
Çizelge 4.17. Rz değeri için model özeti	51
Çizelge 4.18. Yüzey sertlik değerleri.....	57
Çizelge 4.19. Yüzey sertlik değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	58
Çizelge 4.20. Yüzey sertlik değeri için model özeti	58

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.21. ITAB mesafeleri	64
Çizelge 4.22. ITAB büyüklüğü için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	66
Çizelge 4.23. ITAB değerleri için model özeti	67
Çizelge 4.24. Kesme işlemi süreleri	71
Çizelge 4.25. Süre değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları	72
Çizelge 4.26. Süre değerleri için model özeti	72
Çizelge 4.27. Minitab amaç tablosu.....	74

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Lazer ile kesme yönteminin şematik gösterimi	9
Şekil 3.2. 4000W Lazer tezgahında malzeme kalınlığı – kesme hızı grafiği	13
Şekil 3.3. Lazer ışını odak noktası	15
Şekil 3.4. Merkezlenmiş ve merkezlenmemiş lazer ışını.....	16
Şekil 3.5. Isı tesiri altındaki bölge	19
Şekil 3.6. Kesme bölgesi çizgileri.....	20
Şekil 3.7. Kesme yarığı ölçümü.....	21
Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktaları	29
Şekil 4.2. Ra için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık-lazer gücü grafiği.....	34
Şekil 4.3. Ra için kalınlık-basınç ve kesme hızı-lazer gücü grafiği.....	34
Şekil 4.4. Ra için kesme hızı–basınç ve lazer gücü basınç grafiği	35
Şekil 4.5. Ra değeri ana etki grafiği.....	35
Şekil 4.6. Ra etkileşim grafiği.....	36
Şekil 4.7. Ra optimizasyon grafiği.....	37
Şekil 4.8. Rq için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık-lazer gücü grafiği.....	40
Şekil 4.9. Rq için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği	40
Şekil 4.10. Rq için kesme hızı–basınç ve lazer gücü–basınç grafiği	41
Şekil 4.11. Rq ana etki grafiği	41
Şekil 4.12. Rq etkileşim grafiği	42
Şekil 4.13. Rq optimizasyon grafiği	43
Şekil 4.14. Rt için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık lazer gücü grafiği.....	46
Şekil 4.15. Rt için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği.....	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.16. Rt için kesme hızı–basınç ve lazer gücü-basınç grafiği.....	47
Şekil 4.17. Rt ana etki grafiği	47
Şekil 4.18. Rt etkileşim grafiği	48
Şekil 4.19. Rt optimizasyon grafiği	49
Şekil 4.20. Rz için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği	52
Şekil 4.21. Rz için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği	52
Şekil 4.22. Rz için kesme hızı–basınç ve lazer gücü-basınç grafiği.....	53
Şekil 4.23. Rz ana etki grafiği.....	53
Şekil 4.24. Rz etkileşim grafiği.....	54
Şekil 4.25. Rz optimizasyon grafiği.....	55
Şekil 4.26. Sertlik ölçüm noktaları	56
Şekil 4.27. Yüzey sertliği için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği	59
Şekil 4.28. Yüzey sertliği için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği	59
Şekil 4.29. Yüzey sertliği için kesme hızı–basınç ve lazer gücü-basınç grafiği.....	60
Şekil 4.30. Sertlik ana etki grafiği	60
Şekil 4.31. Sertlik etkileşim grafiği	61
Şekil 4.32. Yüzey sertliği optimizasyon grafiği.....	62
Şekil 4.33. ITAB mesafesi için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği	67
Şekil 4.34. ITAB mesafesi için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği	68
Şekil 4.35. ITAB mesafesi için kesme hızı–basınç ve lazer gücü-basınç grafiği.....	68
Şekil 4.36. ITAB ana etki grafiği.....	69
Şekil 4.37. ITAB etkileşim grafiği.....	69
Şekil 4.38. ITAB optimizasyon grafiği.....	70
Şekil 4.39. Süre ana etki grafiği.....	73

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.40. Optimizasyon grafiği	75
--	----

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Cüruf oluşumu	20
Resim 4.1. Durma HD-F 6020 fiber lazer tezgâhı	26
Resim 4.2. Lazer ile kesilen deney numuneleri	29
Resim 4.3. Tesa Technology Rugosurf 20 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	30
Resim 4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	30
Resim 4.5. Parça no. 76 yüzey görüntüsü (kalınlık 8mm).....	30
Resim 4.6. Parça no. 15 yüzey görüntüsü (kalınlık 12mm).....	30
Resim 4.7. Parça no. 35 yüzey görüntüsü (kalınlık 15mm).....	31
Resim 4.8. Sertlik ölçüm cihazı	56
Resim 4.9. ITAB ölçümü yapılan parça örneği	62
Resim 4.10. Parça 75 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü.....	65
Resim 4.11. Parça 6 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü.....	65
Resim 4.12. Parça 28 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü.....	65
Resim 4.13. Parça 10 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü.....	66
Resim 4.14. 18-19-32 numaralı numunelerde çapak oluşumu	74
Resim 4.15. 37-38-60 numaralı numunelerde çapak oluşumu	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

V_c	Kesme Hızı(m/dk.)
R_a	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
R_q	Kuadratik Ortalama Pürüzlülük Değeri
R_z	Ortalama Pürüz Derinliği
R_t	Maksimum Pürüz Derinliği
μm	Mikrometre
CO₂	Karbondioksit
Hz	Hertz
J	Joule
W	Watt
kW	Kilowatt
Dk.	Dakika
Sn.	Saniye

Kısaltmalar

Açıklamalar

ANSI	Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü
HAZ	Isıdan Etkilenmiş Bölge
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
YAG	Yttrium Alüminyum Granat

1. GİRİŞ

Lazer teknolojisi birçok endüstriyel alanda olduğu gibi imalat sektöründe de çeşitli avantajlar sağlaması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknolojinin sanayideki en yaygın uygulama alanlarından birisi metal ve metal olmayan malzemelerin kesilmesi işlemidir. Lazer teknolojisi ile yapılan kesme işlemlerinin, geleneksel kesme yöntemlerine kıyasla tezgâhın ilk yatırım maliyeti dezavantajına rağmen, takım aşınmasının olmaması, yüksek hızlarda malzeme kesebilme, bilgisayar ile kontrol edilebilirlik, işlem sonrası ürün kalitesi gibi birçok yönden avantajları bulunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde olduğu gibi lazer ile kesme yönteminde de ürün kalitesine etki eden farklı işlem parametreleri mevcuttur. Parametrelerin doğru seçilmemesi durumunda ürün kalitesi düşerek işlem sonrası ek işlem gereksinimleri ve dolayısıyla ek maliyetler ve zaman kayıpları ortaya çıkabilmektedir.

Bu çalışmada, 8 mm 12 mm ve 15 mm olmak üzere üç farklı kalınlıktaki St-52 malzeme, bir fiber lazer tezgahında çeşitli parametrelerin değiştirilmesi ile kesilmiş ve işlem parametrelerinin kesim kalitesi üzerindeki etkileri incelenerek optimum kesme parametrelerinin bulunması amaçlanmıştır. Değişken parametreler olarak lazer gücü 3000 W, 3500 W ve 4000 W, kesme hızı 850 mm/dk. 1000 mm/dk. ve 1150 mm/dk. yardımcı gaz basıncı 0,55 bar, 0,65 bar ve 0,75 bar seçilmiştir. Deney tasarım metotlarından birisi olan yanıt yüzey yöntemi kullanılarak oluşturulan 3 tekrarlı deney planına göre, belirlenen parametrelerin tek tek değiştirilmesi ile kesme işlemleri yapılmış ve 10 cm x 5 cm boyutlarında 81 adet deney numunesi elde edilmiştir. İşlemler esnasında diğer tezgâh parametreleri sabit tutulmuştur. İşlem sonrasında numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra), ortalama pürüz derinliği (Rz), kuadratik ortalama pürüzlülük değeri (Rq), maksimum pürüz derinliği (Rt), yüzey sertliği (HRA) ve ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü ölçülmüş, parça başı işlem süresi de çıktılar içerisinde değerlendirilerek Minitab19 paket programı yardımı ile ürün kalitesini en iyileyen optimum parametrelerin bulunması amaçlanmıştır.

LASER kelimesi akronim yazım ile Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ifadesinin baş harflerinden elde edilmiştir. Bu ifade “ışınlandırmanın uyarılmış yayımı ile ışığın kuvvetlendirilmesi” olarak tercüme edilebilir [1].

LASER kelimesinin harflerinin her birinin tek tek açılımına bakıldığında, ışık manasına gelen “Light” ifadesi üretilen elektromanyetik radyasyon tipini tanımlar. Uygulamada, bu sadece insan gözüyle görülebilen ışık değil, aynı zamanda gözlerimizin göremediği uzun dalga boyuna sahip kızılötesi ya da daha kısa dalga boyuna sahip ultraviyole ışınlardır. Radyasyon manasına gelen “Radiation” ifadesinin anlamı elektromanyetik radyasyondur. Yani, ışık hızında hareket eden kütesiz enerji anlamındadır. Bu, görünür ışık, kızılötesi, ultraviyole, radyo dalgası, mikrodalga ve X-ray ışınları şeklinde çeşitli formlarda bulunabilir. Işık ve bahsedilen diğer formlar dalga veya foton olarak bilinen parçacık şeklinde davranabilmektedir. Uyarılmış yayım anlamına gelen “Stimulated Emissions” ifadesi, lazerin özel yollarla ışık üretebildiği anlamındadır. Güneş veya günlük hayatta kullandığımız ampuller ışığı kendi içlerindeki enerjiyi açığa çıkartarak spontane bir şekilde yayarlar ancak lazerler ışığı uyararak ekstra enerjide bir ışık dalgası yaymaktadırlar. Uyarılma anlamına gelen “Amplification” ifadesi ışığın miktarını arttırmak anlamındadır. Bir giriş ışık dalgası, enerjisini giriş dalgasıyla tam olarak eşleşen ikinci bir dalga olarak serbest bırakmak için bir atom veya molekülü uyararak enerjiyi artırır [2].

Belirtilen bu parçaların bir araya getirilmesi, Albert Einstein tarafından önerilen uyarılmış ışın teorisine dayandırılarak Townes’un tarafından gerçekleştirilmiştir.

2. LİTERATÜRDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Yılbaş, CO₂ lazer tezgahında paslanmaz çelik levhalar üzerinde yaptığı çalışmada 3, 4, 5 ve 6cm/s kesme hızı, 0,7 1, 1,2, ve 1,5 mm levha kalınlığı, 75, 125, 175, 225 kPa yardımcı gaz basıncı ve Sürekli dalgalı ve 50, 400, 600, 800 Hz lazer puls frekansı değişkenlerini kullanarak bu değerlerin kesme kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kesme kalitesi değerlendirmesinde oyuklaşma, düzlemsellik ve metalürjik değişimler ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonuçlarına göre, seçilen tüm parametrelerin kesme kalitesine etkilerinin olduğunu, kaliteye etki eden en belirgin parametrelerin kesme hızı ve gaz basıncı olduğu gözlemlenmiştir. Birinci derece etkileşimlerin yani kesme hızı – yardımcı gaz basıncı, malzeme kalınlığı – yardımcı gaz basıncı, lazer puls frekansı-kalınlık etkileşimlerinin dalgalanma, düzlemsellik ve genel kesme kalitesine belirgin etkileri olduğunu belirlemiştir. İkinci derece etkileşimlerin incelenmesine göre kesme hızı – yardımcı gaz basıncı – lazer puls frekansının genel kalite ve dalgalanma üzerinde etkileri olduğu tespit edilmiştir [3].

Rajaram, Sheikh-Ahmad ve Cheraghi 4130 kalite 1,27 mm (0,05 inch) kalınlıklı çelik numunelerini CO₂ lazer kesme tezgahında keserek 700, 900, 1100, 1300 W lazer gücü ve 29,6, 38,1, 46,6, 55,0 mm/s kesme hızının kesme aralığı, yüzey pürüzlülüğü, oyuk sıklığı ve ITAB büyüklüğü üzerindeki birleşik etkilerini değerlendirmişlerdir. Frekans 500 Hz, duty cycle %85, Gaz basıncı 1,3 kgf/cm³, nozül yaklaşma mesafesi 1,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Bu işlemlerde bağımsız işlem parametrelerinin kesim kalitesine etkisini açıklayan modeller geliştirmek için regresyon analizi, her faktörün etkilerini istatistiksel olarak belirlemek için iki faktörlü varyans analizi metodu kullanılmıştır. İşlem sonuçlarına göre kesme aralığı üzerinde lazer gücünün kesme hızına göre daha fazla etkili olduğu, lazer gücünün azaltılıp kesme hızı artırıldığında kesme aralığının ve ısı tesiri altındaki bölgenin azaldığı, yüksek güç seviyelerinde kesme hızının artması kesme aralığının azalmasına ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğünün artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, kesim hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü ve oyuk sıklığının arttığı gözlemlenmiştir [4].

Arcan, CO₂ Lazer kesim tezgahında lazer ışını odak noktası, kesme hızı ve kesme gazı basıncı parametrelerini değiştirerek ve 5 mm kalınlığında ST-44 malzemesi kullanarak kesme parametrelerinin kesme kalitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda farklı parametrelerin setlik değerine etkisinin malzeme içindeki faz değişimlerinin aynı

olması nedeniyle düşük olduğunu, kesme parametrelerinin ayarlanarak düzgün kesim yüzeylerinin elde edilebileceğini belirlemiştir [5].

Öner, 1, 2, 3 ve 4 mm kalınlığındaki AISI 304 kalite paslanmaz çeliğin CO₂ lazer tezgahında 1000, 1200, 1400 ve 1600 W lazer gücü, 200, 250, 300 ve 350 mm/dk. kesme hızı, 100, 500, 1000 ve 1500 Hz lazer puls frekansı değişkenleri ile, duty %100, basınç 10 kg/cm², odak - 2, nozül çapı 1,5 mm, yardımcı gaz azot, sabit değerlerini kullanarak parametrelerin kesme aralığı, oyuk oluşumu ve ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma sonucunda yüksek güç ve yüksek hızlarda daha düzgün yüzeyler elde edilmiş, kesme hızının artması ile kesme aralığının arttığı görülmüştür. Kesilen malzeme kalınlığının artması kesme aralığını arttırmıştır [6].

Andersson ve Granberg tezlerinde CO₂ lazer tezgahında titanyum alaşımı plaka üzerinde (Ti-6Al-4V) Argon ve Nitrojen yardımcı gazları ayrı ayrı kullanılarak 1, 3,2, 6,35 mm malzeme kalınlığı, 0,5, 1,5, 2,5 m/dk. kesme hızı, 2, 3, 4 kW lazer gücü, 12, 16, 20 bar gaz basıncı ve %30, %55 ve %80 lens odak uzaklığı parametrelerinin ısı tesiri altındaki bölge, yüzey düzensizliği ve çapak yüksekliğine olan etkilerini deney tasarım metodu ile incelemişlerdir. Ayrıca deney planında yer almayan yüzey sertliği ölçümü de yapılmıştır. 2 farklı full faktöriyel deney tasarım metodu ile deney planı hazırlanmıştır. Sonuçlara göre malzeme kalınlığı ve kesme hızı en önemli etkiyi gösteren iki parametre olduğunu, lazer gücü ve gaz basıncının da kesme kalitesi üzerinde etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [7].

Ghany ve Newishy Nd:YAG lazer ile 1,2 mm kalınlığındaki östenitik paslanmaz çelik üzerinde optimum tezgah parametrelerinin bulunması üzerine çalışmışlardır. İşlemde sürekli ve darbeli mod, yardımcı gaz olarak nitrojen ve oksijen gazları ayrı ayrı kullanılmıştır. İşlem sonucunda lazer kesme kalitesine etki eden parametrelerin temel olarak lazer gücü, darbe frekansı, kesme hızı ve odak pozisyonu olduğu tespit edilmiştir. Optimum kesme değerleri darbeli modda, 210 W lazer gücü, 200-250 Hz frekans, 1-1,5mm kesme hızında, 9-11 bar nitrojen ve 2-4 bar oksijen gaz basıncı olarak tespit edilmiştir. Frekansın ve kesme hızının artması çentik genişliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olduğu, nitrojen gazının oksijene göre daha parlak ve yumuşak kesim yüzeyi oluşturduğu ancak ekonomik olmadığı tespit edilmiştir [8].

Wandera ve Kuanpaa, fiber lazer tezgahında 10mm kalınlıklı paslanmaz çelik kullanarak optimum lazer kesme parametrelerini bulma üzerine çalışma yapmıştır. Değerlendirmeye alınan parametreler kesme hızı, odak pozisyonu ve odak uzaklığıdır. Parametrelerin optimize edilmesi ile kesme yüzeyindeki çapak oluşumunun engellenmesi amaçlanmıştır. İşlemden lazer gücü 4 kW, yardımcı gaz nitrojen 20 bar, nozül çapı 2,5 mm, nozül yaklaşma mesafesi 0,7 mm olarak sabit tutulmuş full faktöriyel deney tasarım metodu ile 24 farklı deney planlanmıştır. İşlem sonucunda daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve çapaksız kesme kenarları için kesme hızının düşürülmesi, lazer ışınının daha iyi odaklamak için daha uzun odak uzaklığı lensi kullanılması gerektiği tespit edilmiştir [9].

Erdoğan, lazer ile delme işleminde CO₂ tezgah parametrelerinin delik kalitesine olan etkisini incelemiş, işlem parametreleri olarak 1,2-4 mm iş parçası kalınlığı, 2500-4000 W lazer gücü, (-4)-(-2) inch odaklama mesafesi, 8-14 bar yardımcı gaz basıncı, 500-1200 Hz lazer frekansı seçilmiştir. İşlem sonucunda optik mikroskoptan elde edilen görüntüler ile delik çapı ölçümü, ITAB ve yeniden katılan bölge büyüklüğü incelenmiştir. Farklı kalınlık değerleri için farklı işlem parametrelerinin optimum sonuçları verdiği tespit edilmiştir [21].

Patel ve Patel yaptıkları çalışmada 6mm kalınlıkta hardox 400 malzeme kullanarak karbondioksit lazer kesme tezgahında 100, 1500, 2000 Watt lazer gücü, 0,5, 0,6, 0,7 bar gaz basıncı, 20, 25, 30 Hz. darbe frekansı ve 200, 400, 600 mm/dk. kesme hızı parametrelerini değerlendirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda kesme aralığının lazer gücü, frekans, gaz basıncı ve kesme hızına bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre 1000 Watt lazer gücü, 0,6 bar gaz basıncı, 200 mm/dk. kesme hızı 25 Hz. darbe frekansı değerleri ile en dar kerf genişliğine ulaşılabildiği tespit edilmiştir [18].

Prajapati, Patel ve Khatri yumuşak çelik ve hardox-400 malzemenin lazer tezgahında kesiminde kalite açısından lazer gücü, gaz basıncı, kesme hızı ve malzeme kalınlığının etkilerini incelemişlerdir. Deney, her bir giriş parametresinin üç farklı seviyeye sahip olduğu Taguchi L₂₇ ortogonal dizisine göre tasarlanmıştır. Sonuçların yorumlanması için varyans analizi yapılarak deney sonucunu doğrulayan sinyal/gürültü oranı esas alınmış ve optimum parametreler elde edilmiştir. Deneyde kullanılan parametreler, 1600, 1800 ve 2000 Watt lazer gücü, 0,5, 0,6, 0,7 bar gaz basıncı hardox-400 için 800, 1000, 1200 mm/dk. kesme hızı, yumuşak çelik için 1500, 1750 ve 2000 mm/dk. kesme hızı, 6mm, 8mm ve 10mm kalınlıklı iş parçalarıdır. Sabit parametreler ise 7,5" lens, yardımcı gaz oksijen, duty cycle %85, nozül

çapı 2,5 mm'dir. Sonuçlara göre her iki malzeme için de yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme hızı, gaz basıncı ve malzeme kalınlığı en önemli etkiyi gösteren parametrelerdir [20].

Madiç ve Radovanoviç'in çalışmasında AISI 304 paslanmaz çeliğin CO₂ lazer ile kesilmesi sonucu ısı tesiri altındaki bölge incelenmiştir. Isıdan etkilenen bölgenin matematiksel modeli lazer gücü, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı ve odak mesafesi gibi lazer kesim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak yapay sinir ağı modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Deneysel kesme çalışmaları için Taguchi L₂₇ ortogonal dizisine göre her bir parametrenin 3 farklı düzeyi için toplam 27 deney planı yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda lazer gücü 1,6, 1,8 ve 2 Watt, kesme hızı 2, 2,5, ve 3 m/dk. yardımcı gaz basıncı 9 bar, 10,5 bar ve 12 bar, odak pozisyonu -2,5, -1,5 ve -0,5 mm olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda kesme hızının ısı tesiri altındaki bölge için en etkili parametre olduğu tespit edilmiş ve etki sırasına göre lazer gücü, odak noktası ve yardımcı gaz basınçlarının da ısı tesiri altındaki bölge üzerinde etkili oldukları görülmüştür [22].

Cekic, Begic ve Kulenovic CO₂ lazer kullanarak üç farklı alaşımlı çeliği işlem parametreleri hakkında optimizasyon yaptıkları deneysel çalışmalarında yardımcı gaz olarak oksijen, nitrojen ve hava kullanmışlardır. Kullanılan parça kalınlıkları 3 ve 4 mm lazer tezgâh gücü 2000 Watt, lazer ışını dalga boyu 10600 nm, nozül çapı 2 mm'dir. Deneydeki amaç, süreci etkileyen parametrelerin optimizasyonu yolu ile maksimum tasarruf ve kalite değerlerini sağlamaktır. Deney sonucunda kerf genişliği, ısıdan etkilenen bölge, yüzey sertliği ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür ve çeliklerin lazer ile kesilmesi sırasında yardımcı gaz olarak oksijen kullanılarak daha yüksek kesme hızlarına çıkılabildiği, azot kullanılarak yapılan kesim sonucunda ise son işlem gerektirmeyen kaliteli ve parlak bir yüzey elde edildiği tespit edilmiştir [23].

Cekic, Begic-Hajdarevic, Kulenovic ve Omerspahic yaptıkları çalışmada yardımcı gaz olarak nitrojen kullanarak, karbondioksit lazer tezgahında kesilen iki farklı alaşımlı çelik için yüzey pürüzlülüğü ve ısıdan etkilenen bölgenin matematiksel modelini bulmayı amaçlamışlardır. Deneylerde 550, 725, 900, 1075 ve 1250 mm/dk. kesme hızı, -2, -1, 0, 1, 2 mm lazer odak pozisyonu, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5 bar gaz basıncı ve 0,5, 0,75, 1, 1,25, 1,50 mm yaklaşma mesafesini değişken olarak alıp lazer gücün 2000 Watt, nozül çapını 2 mm sabit değer olarak tanımlayarak lazer kesim tezgahında maksimum kalitenin elde

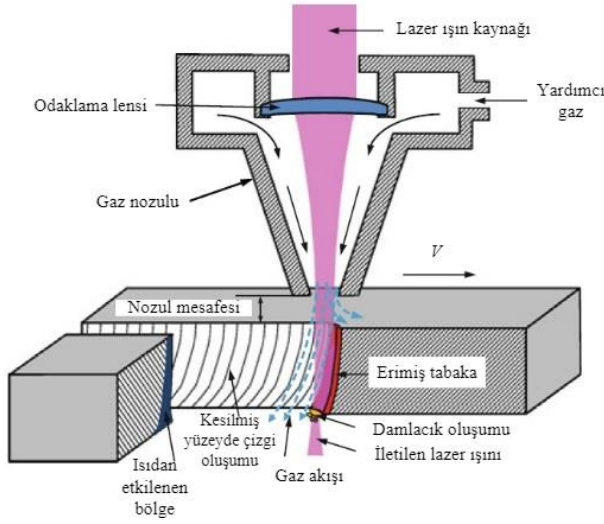
edilebilmesi için matematiksel modeli oluşturarak optimum parametreleri hesaplamışlardır [25].

Zaied, Bayraktar, Katundi, Boujelbene ve Miraoui çalışmalarında S235 düşük karbonlu çeliğin karbondioksit lazer tezgahındaki işleme parametrelerini araştırdıkları çalışmalarında yüzey pürüzlülük değerlerini matematiksel olarak modellemişlerdir. Yapılan çalışmada 8mm kalınlıklı malzeme kullanılmış, 600, 1200 ve 2200 m/dk. kesim hızı, 3, 4, 5 kW lazer gücü değişken parametreler olarak değerlendirilmiştir. ANOVA analizi istatistiksel metot olarak kullanılmış olup deney sonucu kesme hızının ve lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülerek oluşturulan matematiksel model kullanılarak optimum parametreler bulunmuştur [26].

Bernat ve arkadaşları bir fiber lazer kesme tezgahında kesme hızı ve lazer gücünün ölçüsel doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında deney malzemesi olarak 6mm kalınlığında yapı çeliği ve paslanmaz çelik kullanmışlardır. Kesim sonuçlarına göre istenen kalitenin elde edilebilmesi için kesme hızının arttırılması ve lazer gücünün azaltılması ile daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir [28].

3. LAZER İLE KESME YÖNTEMİ

Lazer ile işleme prosesi metal, ametal, sünek veya sert malzemelerin ve karmaşık geometriye sahip malzemelerin işlenmesi, yüzeylerinin iyileştirilmesi, kaynaklı imalat, yüzey kaplama, ergitme, kesme, markalama gibi işlemlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntem, karmaşık imalat işlemlerini kolaylaştırdığı, diğer kesim yöntemlerine kıyasla talaş kaldırma oranının az olduğu, takım aşınması olmadığı, seri imalata uygun olduğu için ilk yatırım maliyetinin fazla olması dezavantajına rağmen genellikle tercih edilen bir yöntemdir. Şekil 4.1.'de lazer ile kesme yöntemi temel olarak gösterilmiştir [16].



Şekil 3.1. Lazer ile kesme yönteminin şematik gösterimi

Lazer ışını sistem içerisinde üretildikten sonra kesme kafasına kadar iletilip, bu bölgede ışını odaklayarak iş parçası yüzeyine iletirler. Gönderilen bu ışın iş parçasının ısınmasını ve hızlı bir şekilde erimesini sağlar. Sistem içerisinde gönderilen gaz hem lazer ile kesim yapılan alanı dış ortam gazlarına karşı korur hem de eriten malzemenin uzaklaştırılmasını sağlar [1]. Lazer ile kesme işleminin kalitesi, lazer ışını, tezgâh parametreleri, kullanılan gaz ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir. Işın dalga boyu, lazer gücü, gaz basıncı, nozül çapı, kesme hızı ve darbe süresi, lazer kesim işleminde önemli parametreler arasında yer almaktadır. Malzeme yüzeyine iletilen radyasyonun dalga boyu aracılığı ile parça üzerinde ergime işlemi başlar. Bu nedenle termal iletkenlik bu işlemde önemli bir özelliktir [9,10].

3.1. Lazer ile Kesme Yöntemleri

Lazer ışını ile kesme metotları kesilen kısımdan malzemenin uzaklaştırılmasına göre 3 başlık altında toplanmaktadır. Bu yöntemler;

- Ergiterek kesme (fizyon)
- Yakarak kesme (alevli)
- Arıtarak kesme (Buharlaştırma)

3.1.1. Ergiterek kesme (Fizyon)

Bu yöntemde malzeme, lazer ışınının gücü ile eritilir, işlemde ana unsur, malzemenin eriyik fazda kalma süresidir. Eriyen malzeme basınçlı yardımcı gaz ile püskürtülerek uzaklaştırılır. Kullanılan gazlar azot, argon, helyum veya basınçlı havadır. Malzeme kalınlığı ve malzeme erime sıcaklığı arttıkça kesme hızı düşürülmeli, lazer gücü yükseltilmelidir. Arıtarak (buharlaştırarak) kesme işlemine göre daha az enerji harcanarak yapılan bir işlemdir. Bu işlem genelde yüksek alaşımlı çeliklerin, alüminyumun ve titanyum alaşımlarının kesilmesi için kullanılır [30].

Standart bir ergiterek kesme işleminde;

- İşlem, malzemenin buharlaşmasına fırsat vermeyecek kadar kısa sürede yapılmalıdır.
- Kullanılan yardımcı soy gazlar iş parçası kesme yüzeyindeki oksitlenmeyi engellemektedir.
- Yakarak kesme ile karşılaştırıldığında kesme hızı daha düşüktür.
- Bütün metal malzemeler bu yöntem ile kesilebilir [30,44].

3.1.2. Yakarak kesme (Alevli)

Lazer ile yakarak kesim metodunda, eriterek kesimden farklı olarak kesme işlemi esnasında kesme kafasının yanından ilave kesme gazı olarak oksijen gazı parça üzerine gönderilir. Oksijen ile iş parçası ekzotermik (dışarıya ısı veren) bir reaksiyona girerek lazer ışınının normal gücünden daha fazla ısı enerjisi oluşturmakta ve kesme sıcaklığının artmasına yardımcı olmaktadır. Yakarak kesme yöntemi, ergiterek kesme yönteminden daha hızlı bir yöntemdir. Kesme hızı lazer gücü ile orantılıdır. Lazer gücüne bağlı olarak oksijen ve enerji

iletimi de kesme hızını etkiler. Bu yöntemin dezavantajı ise oksijenin kesme kenarında oksit tabakası oluşturmaması ve işlem esnasında erimiş olan malzemenin kesme izi oluşturmamasıdır. Bu yöntem genellikle çelikler, düşük alaşımlı çeliklerin kesilmesinde kullanılır [13,30]. Oksijenin saflığının kesme kalitesine etkisi büyüktür. Kesme işlemi esnasında havada bulunan azot, kesme gazı olan oksijene karışarak çapak oluşumuna sebebiyet verebilmektedir. Kesme işlemi esnasında havada bulunan azotun kesme gazı olan oksijene karışma oranı %0,2'dir.

3.1.3. Arıtarak kesme (Buharlaştırma)

Bu yöntemde adından da anlaşılacağı gibi, lazer ışınının etkisi ile iş parçasının kesilecek bölümü kesme kafası önünde doğrudan buharlaştırılarak kesme işlemi yapılır. Kesme gazı, buharlaştırma alanında koruyucu bir gaz tabakası oluşturur. Darbeli lazer ile metallerin kesilmesinde yüksek lazer güç yoğunluğuna ihtiyaç duyulur. Eriyen malzemenin atılmasını önlemek için, malzeme kesme bölgesinde yoğunlaşmamalıdır. Bu nedenle malzemenin kalınlığının lazer ışınının çapından büyük olmaması gerekmektedir. Kalın malzemelerin bu yöntem ile kesilmesi uygun değildir. Buharlaştırılan malzeme kesme esnasında oluşan kapiller aralığı tekrar kapatmaktadır. Bu yöntemde iş parçası erimesi neredeyse yok denecek kadar az olup ilave gazın yardımıyla parlak, oksidasyon oluşmamış ve düzgün bir kesim yüzeyi elde edilebilmektedir [1,13]. Bu işlemin dezavantajı ise kesme hızının yavaş olması, metal malzemelerde yüksek kalınlıklı iş parçalarının kesilememesidir. Metal haricindeki katı-eriyik geçiş fazı tam belirgin olmayan kâğıt, kompozit, plastik, seramik gibi çeşitli malzeme türleri için bu yöntem kullanılabilir.

3.2. Lazer ile Kesme Yönteminde Etkili Olan Parametreler

Lazer ile malzeme kesiminde işlem sonuçlarının kalitesine kontrol edilebilen ve kontrol edilemeyen çeşitli parametrelerin etki eder. En iyi kalitenin elde edilebilmesi açısından kontrol edilebilen parametrelerin örneğin lazer ışını, kesme hızı, yardımcı gaz basıncı vb. en uygun seviyelerde olması gerekmektedir. Kesilecek olan malzemenin de lazer kesim kalitelerine etkisi vardır, bu nedenle kontrol edilebilen parametrelerin malzeme kalınlığına göre seçilmesi gerekir. Kontrol edilebilen bu parametrelerden bazıları aşağıda açıklanmıştır [29].

3.2.1. Lazer ışınının gücü

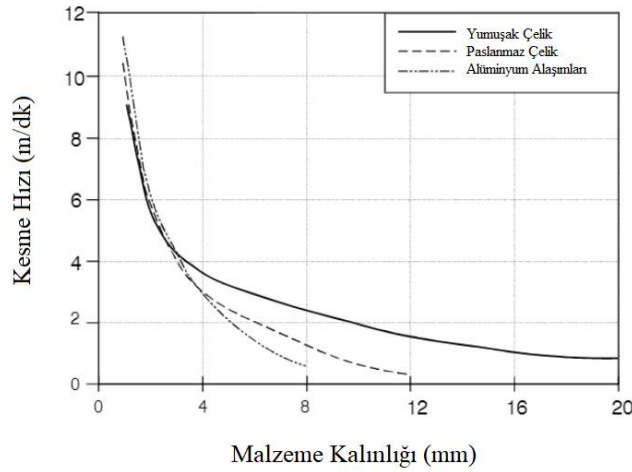
Lazer sistemlerinin isimleri genellikle lazer gücü baz alınarak belirlenmektedir. Lazer sisteminin gücü saniyede lazer ışığı şeklinde yaydığı toplam enerji miktarına denilir. Lazer ışın gücü malzemenin özellikleri göz önüne alınarak ayarlanır. Ekonomik olarak kesme işleminin daha kısa sürede yapılması için kesme hızının artırılması gerekir, ancak bu durumda da lazer ışınının gücü artırılmalıdır. Malzemenin kalınlığı malzemenin cinsi, kaplama özellikleri gücün ayarlanması için önemli etkenlerdir. Örneğin güçlendirilmiş kalın bir çeliği kesmek için gereken ışın gücü, ince bir çelik plakayı kesmek için gereken ışın gücüne göre daha fazla olmalıdır. Kesilebilecek malzeme kalınlığı lazer tezgahının gücüne göre değişkenlik göstermektedir. Lazer gücünün artması daha kalın malzemelerin kesilmesine olanak tanır. Yetersiz güç değeri ile kesme işlemi gerçekleştirilemez [30].

Çizelge 3.1. Çeşitli lazer güçleri için kesilebilecek malzeme kalınlıkları

Lazer Gücü		2000W	2700W	3200W	4000W
Malzeme	Kesme Tipi	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Kalınlığı (mm)
Yumuşak Çelikler	Oksijen	12	15	20	20
	Basınçlı Hava	2	3	3	3
Paslanmaz Çelikler	Nitrojen	4	6	12	15
	Basınçlı Hava	3	3	3	3
Alüminyum	Nitrojen	3	5	8	10
	Basınçlı Hava	1	1	2	2

3.2.2. Kesme hızı

Malzeme kesim hızı kesme kesim kalitesine etki eden bir başka faktördür. Gereğinden fazla veya gereğinden az kesme hızları kesilen malzeme yüzeyinde çapak oluşumunu ve yüzey pürüzlülüğünü artırıcı etki gösterir. Genel olarak lazer gücünün sabit tutulduğu durumlarda kesme hızı malzeme kalınlığı ile ters orantılı olarak değişir. [7,41]. Isıdan etkilenen bölge büyüklüğü kesme hızının artması ile azalır. Bunun sebebi ısı enerjisinin malzeme üzerinde daha az süre kalacağı için ısı transferini daha az gerçekleştirmesidir [43].



Şekil 3.2. 4000W Lazer tezgahında malzeme kalınlığı – kesme hızı grafiği

Kesme hızı sadece malzeme kalınlığı ile belirlenmeyip, hızı sınırlayan bir diğer faktör de lazer gücüdür. Lazer gücünün (P), kesilen iş parçasına göre belirlenen katsayı (B), kesme hızı (V), kesilen malzemenin kalınlığı (d), lazer odaklama çapı veya kerf genişliği (w_k) arasındaki bağıntı Eş.3.1.'de belirtilmiştir [9,32]. Malzemelerin lazer ile kesilmesi için ihtiyaç olan güç değeri her malzeme için değişkenlik gösteren B katsayısının ve diğer parametrelerin eşitlikte yerine yazılması ile elde edilebilir [33].

$$P = B \cdot w_k^{0.01} \cdot d^{0.21} \cdot v^{0.16} \quad (W) \quad (3.1)$$

Çizelge 3.2. 1 mm malzeme için kesme hızları

Lazer Gücü		2000W	2700W	3200W	4000W
Malzeme	Kesme Tipi	Kesme Hızı (m/dk)	Kesme Hızı (m/dk)	Kesme Hızı (m/dk)	Kesme Hızı (m/dk)
Yumuşak Çelikler	Oksijen	8,2	8,2	8,2	8,2
	Basınçlı Hava	5,5	8	9,8	19
Paslanmaz Çelikler	Nitrojen	8,1	9,2	10,5	10,5
	Basınçlı Hava	6,5	8	9,5	20
Alüminyum	Nitrojen	9,1	10,2	11,5	11,4
	Basınçlı Hava	10	14	15	18

3.2.3. Odak çapı

Işının odak çapı, kerf genişliğini etkileyen bir faktördür. Kullanılan merceklerin mesafesi değiştirilerek odağın yüksekliği ayarlanabilir. Eğer odak çapı küçük ise ışın genişliği dardır. Kalın malzemelerin kesme işlemlerinde kesme çizgilerinin dik olması ve eritilen kısmın işlem alanından hemen uzaklaştırılması amacıyla büyük odak çapları ve uzun odak mesafeleri kullanılır [10]. İşlem esnasında yüksek kesme hızlarına çıkabilmek ve malzemenin üzerine yüksek güç yoğunluğu aktarabilmek için odaklanma çapının mümkün olduğunca az olması gerekmektedir [14].

Odaklama çapı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$d_a = 2,44.K.F/D \quad (3.2)$$

d_a : Odak noktası çapı

K: Optik ışın moduna bağlı bir sabit

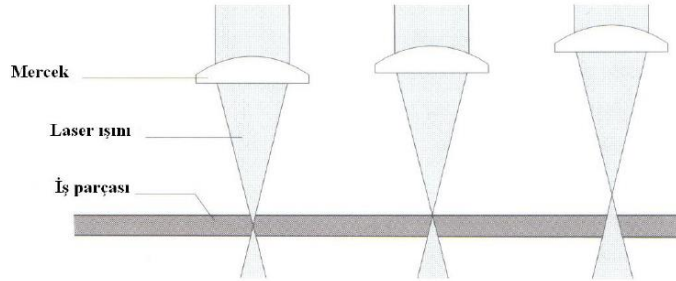
F: Mercek veya aynanın odak uzunluğu (mm)

D: Lazer optik dalga boyu (μm)

3.2.4. Odaklama noktası

Odaklama noktası, lazer ışınının çapını, kesme bölgesinin biçimini ve iş parçası üzerine etki eden lazer güç yoğunluğunu etkilemektedir. En uygun odak noktasının seçimi işlem tipine göre seçilir. Alevle kesme yönteminde odak noktası malzeme yüzeyinin yakınında bir nokta olmalıdır. Azot ile ergiterek yapılan kesme işleminde eriyen malzemenin viskozitesini azaltmak ve malzeme üzerindeki çapakları azaltmak için odak noktası malzeme yüzeyinden bir miktar daha içeride seçilir [10]. Yapılacak işleme göre odak konumunun seçimi yapılabilmesi için genellikle başlangıçta odak konumu olarak malzeme yüzeyi seçilmekte ve kesim durumuna göre odak konumu belirlenmektedir. Tecrübelerle göre ince sacların kesilmesi için odak konumunun malzeme yüzeyine yakın, kalın sacların kesilmesi için odak konumunun malzeme yüzeyinden malzeme kalınlığının yaklaşık olarak 1/3'ü kadar içeriye ayarlanması uygun görülmüştür. Bazı durumlarda ise cüruf oluşumu nedeniyle malzeme üzerinde cüruf yapışmasını engellemek amacıyla odak konumu malzemenin alt kısmı olarak

seçilir, malzemenin alt kısmındaki eriyik daha sıcak olacağından daha akışkan bir vaziyette olur ve yüzeye yapışmadan basınçlı gazın etkisi ile iş parçasından uzaklaşır [14].



Şekil 3.3. Lazer ışını odak noktası

3.2.5. Gaz türü

Kesme işleminde kullanılan gazın türü kesim kalitesini doğrudan etkileyen bir başka faktördür. Gaz türü, kesilecek malzemeye uygun olarak seçilir. Uygun gaz seçilmemesi durumunda malzeme kesim yüzeyinde istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Kullanılan gazın mutlaka yüksek saflık derecesinde, gaz iletim ekipmanlarının da gazın saflığına etki etmeyecek temizlikte ve uygunlukta olması gerekir. Kesme gazlarının kesim kalitesine çeşitli etkileri vardır. Asal gazlar erimiş metalin kesme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlar. Oksijen gibi aktif gazlar ise malzeme ile ekzotermik reaksiyona girer. Aynı zamanda optik malzemeler gaz akışı sayesinde erimiş metal sıçramalarına karşı korunurlar. Ek olarak, gaz akışı ITAB bölgesini dart tutabilmek amacıyla malzemeyi soğutma görevi de üstlenirler. İşlem esnasında oluşan erimiş malzemenin uzaklaştırılmasını engelleyen reaksiyon ürünlerinin oluşmasını engellemek için inert gazların kullanılması zorunludur. Çoğu çelik malzemeler için argon ya da azot kullanılması önerilmektedir [42].

3.2.6. Gaz basıncı

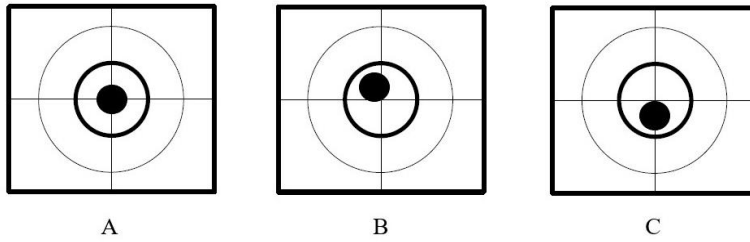
Kesme kalitesini etkileyen bir diğer parametre ise kesme gazının basıncıdır. Kesme gazı basıncı eritilmiş malzemenin kesme yüzeyinden uzaklaştırılması ve ısıdan etkilenen bölgenin soğutulması için önemlidir. Kesme gazı basıncının ayarı malzemeye ve kesme işlemine göre değişiklik gösterir. Kesilecek olan malzeme kalınlığı arttıkça aynı kalitenin elde edilebilmesi için gaz basıncının artırılması gerekmektedir [43].

3.2.7. Nozül tipi ve çapı

Nozüller lazer ile kesme işlemi esnasında lazer ışını ile gaz akışını aynı eksende tutmaya yarayan parçalardır. Kesme işleminde kullanılan nozüller lazer ışınına maruz kalmayacak şekilde tasarlanmaktadır. Nozüllerin tipi gaz akış tipini ve şeklini etkiler bu da kesme kalitesine etki etmektedir. Bu nedenle aynı çapta farklı tip nozüller kullanılarak aynı gaz basınçlarında farklı sonuçlar elde edilebilmektedir. Piyasada en yaygın olarak kullanılan nozül, paralel konik veya silindirik tipteki nozüllerdir [14,30]. Nozül çapı, çıkacak olan gaz basıncını ve miktarını belirleyen bir etmendir. Malzeme kalınlığı arttıkça kesilen bölgeden uzaklaştırılması gereken malzeme miktarı fazla olacağından dolayı daha fazla miktarda gaz ihtiyacı oluşmaktadır. Bu nedenle malzeme kalınlığı arttıkça nozül çapının artması gerekmektedir.

3.2.8. Lazer ışını ve nozülün merkezlenmesi

Lazer ışını nozül geçerek iş parçasına ulaştığı için merkezleme işleminin düzgün yapılması esastır. Işının nozüle merkezlenmemesi durumunda ışın nozüle temas etmesi nozülün ısınıp deforme olmasına ve istenen kesim kalitesinin sağlanmamasına sebep olur.



Şekil 3.4. Merkezlenmiş ve merkezlenmemiş lazer ışını

3.2.9. İş parçası yüzeyi

Yüzeyi parlak olan malzemeler ışığı yansıtma potansiyeline sahiptirler. Bunun haricindeki yüzeyi boyalı, kaplamalı veya cilalı malzemeler genellikle saf hallerine göre aynı şartlar altında daha kötü kesim kalitesi sonuçları verirler. Yüzeyi yağ filmi ile kaplı olan malzemeler ise yüksek lazer gücü ile yapılan kesimlerde olumlu sonuç vermekte ve

yüzeydeki cüruf tabakası miktarı azalmaktadır. Yüzeyi paslı olan malzemelerin kesme işleminde, pas nedeniyle yüzeylerde yanık oluşur [5].

3.2.10. Lazer ışını dalga boyu

Lazer ışınının dalga boyu lazer aktif malzeme tarafından oluşturulur. Lazer ışınının metaller tarafından daha fazla absorbe edilmesi için dalga boyunun azalması gerekmektedir. Aynı zamanda dalga boyunun azalması ile lazer ışınının odaklanması kolaylaşmaktadır. Bu iki nedenden dolayı lazer ışınının dalga boyu lazer ile kesme işlemi için önemlidir. Örnek olarak 1,06 μm dalga boyu olan bir Nd:YAG lazeri, 10,6 μm dalga boylu bir karbondioksit lazerine tercih edilmektedir. Ancak diğer güç ve ışın kalitesi gibi teknik faktörler nedeniyle katı hal lazerleri tam verim ile çalıştırılmamaktadırlar [14,30].

3.3. Lazer ile Kesme Yönteminde Kullanılan Gazlar

Lazer ile kesme işleminin istenilen kalitede yapılabilmesi için, yakarak, buharlaştırarak veya ergiterek yapılan kesim işlemlerinde, her bir prosese uygun gaz seçimi önemli ve gereklidir. Kesme gazının görevi kesme işleminden sonra oluşan cürufları, eriyikleri veya metal buharını kesim alanından uzaklaştırmak ve odaklama merceğinin kirlenmesini önlemektir. Buna ek olarak, bazı kesme gazları malzemeler ile reaksiyona girerek kesme işlemini hızlandırmaya ve malzeme yüzeyini korumaya destek olmaktadır [14,19].

3.3.1. Oksijen gazı

Oksijen gazı genellikle yakarak kesme işlemlerinde kullanılmaktadır. Oksijen kesilen malzeme ile reaksiyona girerek ek ısı üretir ve üretilen bu ısı sayesinde kesme hızı artar. Kullanılan gazın saflığı işlem kalitesine büyük oranda etki eder. Buna ek olarak kullanılan gaz ne kadar saf olursa olsun kesme bölgesinde havadaki azotun veya nemin difüzyonu, uygun olmayan gaz iletim hortumlarının veya ekipmanların kullanımı sebebiyle gazın saflık oranı azalabilmektedir. Bu durum da kesme kalitesine etki etmektedir [44].

3.3.2. Argon ve azot gazları

Lazer ile buharlaştırarak veya ergiterek kesme işleminde eritilen malzemenin kesme bölgesinden uzaklaştırılması için düşük reaksiyon hızına sahip gazların veya soy gazların kullanılması gereklidir. Belirtilen gazlar için genellikle azot ve argon gazları kullanılmaktadır. Argon ve azot gazları kesme bölgesinde yanma oluşumunu engelleyerek kesme yüzeyinin oksitlenmesini engellemektedir. Böylelikle lazer ile yakarak yapılan kesme işleminden sonra yüzeyin tekrar işlenmesine gerek kalmamaktadır. Azot genellikle yüksek alaşımlı çeliklerin kesilmesi için, Argon da genellikle titanyum ve alaşımlarının lazer ile kesilmesi için kullanılmaktadır [14,19].

3.3.3. Basınçlı hava

Basınçlı hava genellikle ince sac malzemelerin kesilmesi için kullanılmaktadır. Hava ile yapılan kesme işlemi ergiterek kesme işlemidir. Kullanılan havanın yağsız ve kuru olması önemlidir. 5 kW lazer gücü ve 6 bar basınçta 2 mm alüminyum malzemenin çapaksız olarak kesildiği tespit edilmiştir [5,14].

3.4. Lazer ile Kesme Yönteminin Avantajları

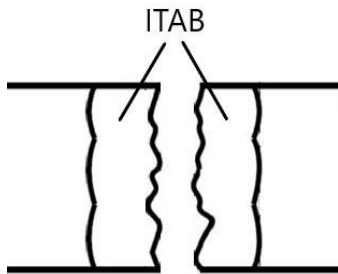
- Lazer ile kesme yöntemi geleneksel kesme yöntemlerine göre daha hızlıdır.
- İlk yatırım maliyeti yüksek olmasına rağmen ilerleyen zamanlarda maliyet oldukça düşmektedir.
- Herhangi bir kalıp gerekmediği için kalıp ile ilgili mali yükler yoktur.
- Fire oranı az olduğu için maliyeti düşürür.
- Isıdan etkilenen bölgenin küçük olması sebebiyle kimyasal yapıda büyük bir değişim gözlenmez.
- Hassasiyet oranları yüksektir, bu nedenle işlemin kalite seviyesi yüksektir.
- Farklı malzeme türleri için uygulanabilir.
- Çeşitli geometrik şekillerdeki malzemeler üzerinde uygulama yapılabilir.
- Takım aşınması yoktur [19].

3.5. Lazer ile Kesim Sonuçlarının Değerlendirilmesi

3.5.1. Isıdan etkilenen bölge

Lazer ile kesme işlemi yüksek sıcaklıklarda yapıldığı için malzemenin kesilen yüzeyinin ısıdan etkilenmesi ve malzeme yapısında değişimler görülmesi beklenen bir durumdur. Yapısı değişen bu bölge genellikle ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) olarak adlandırılır. Bu bölge genellikle malzemenin dağılayıcılar ile uygun şartlarda hazırlanması sonrasında optik mikroskop veya ışın mikroskobu yardımı ile tespit edilmektedir. Kesim bölgesinin aşırı ısınması şu sebeplerden kaynaklanabilmektedir;

- Lazer ışınının normal değerinden yani kesilen parça için olması gereken lazer gücünden daha yüksek olması
- Malzeme kesim hızının, kesilecek malzemeye göre normal değerinden daha yavaş olarak ayarlanması ve bu sebeple malzemenin kesilen bölgesinin lazer ışınına olması gerekenden daha fazla maruz kalması
- Yardımcı gaz basıncının normal değerinden daha düşük olması



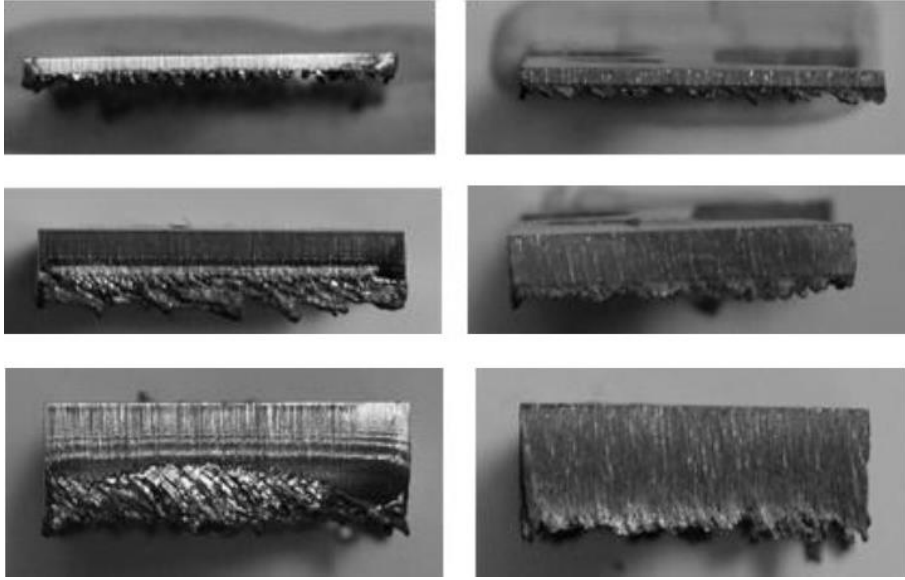
Şekil 3.5. Isı tesiri altındaki bölge

3.5.2. Cüruf (Çapak) oluşumu

Kesim işlemi esnasında kesilen bölgedeki eriyen metal basınçlı gaz yardımı ile dışarı atılmaktadır. Ancak bazı durumlarda eriyen metal malzemenin kesilen bölgesine kalarak çapaklanma oluşturabilmektedir. Cüruf oluşumunun nedenleri şu şekilde sıralanabilir.

- Yanlış kesim hızı seçimi
- Yanlış lazer gücü seçimi
- Yanlış odak noktası seçimi
- Yanlış gaz basıncı seçimi

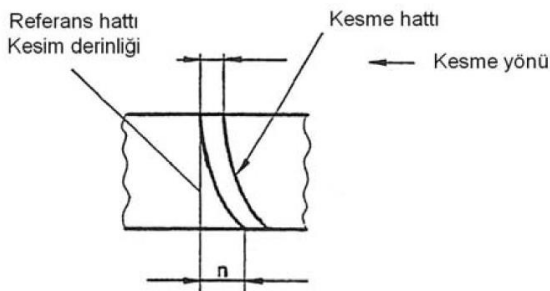
Kesim parametrelerinin doğru ayarlanmaması malzemenin yeterince eritilip kesim bölgesinden zamanında uzaklaştırılamaması dolayısıyla iş parçası üzerinde çapaklanmaya sebep olmakta ve kesim işlemi sonrasında bu çapakların temizlenebilmesi için ek iş gücü gereksinimine, zaman kayıplarına ve maliyet kayıplarına yol açmaktadır.



Resim 3.1. Cüruf oluşumu

3.5.3. Kesme bölgesi çizgileri

Malzemenin kesilen yüzeyinde kesme hattı boyunca çizgiler oluşmaktadır. Kesim hızı eğer yüksek değil ise çizgiler lazer ışını ile aynı doğrultuda, kesim hızı yüksek ise lazer ışınının kesim yönünün tersine doğru kesim çizgileri oluşmaktadır. Bu çizgiler aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü olarak işlem kalitesine etki eder. Kesme hızı, nozül mesafesi, lazer gücü gibi parametrelerin doğru seçilmesi daha düzgün kesme çizgileri elde edilebilmesini ve istenen kalitenin elde edilmesini sağlar [13].



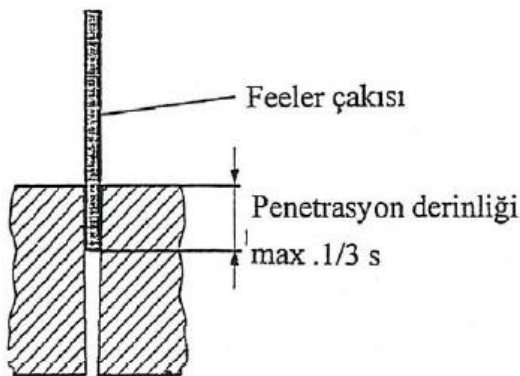
Şekil 3.6. Kesme bölgesi çizgileri

3.5.4. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, lazer ile kesme işleminden sonraki kesim yüzeyinin işlem parametrelerinden etkilenmesi sebebiyle oluşur. Kaliteye etki eden en önemli faktörlerden biridir. Malzemenin kesim bölgesinin çeşitli noktalarından alınan pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak bulunur. Kesilen bölge incelendiğinde iki farklı bölge görülür. Üst kısım lazer ışının giriş yaptığı taraf aralarında belirli mesafenin olduğu ve düzgün olukların bulunduğu kısımdır. Alt kısım ise daha düzensiz ve daha kaba yüzey karakteristiklerinin bulunduğu çıkış kısmıdır [42]. DIN 9013 standardına göre kesilen malzemeler 2mm'den daha ince malzeme ise pürüzlülük değeri malzemenin orta noktasından alınır. Eğer kesilen malzeme 2mm'den kalın malzeme ise kesim bölgesinin üst yüzeyinden 2/3 derinlikte ölçüm yapılarak pürüzlülük değeri tespit edilir. Pürüzlülüğe etki eden en önemli faktörler kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncı değerleridir. Bu değerlerin değişimine göre yüzey pürüzlülük değeri değişkenlik gösterir.

3.5.5. Kesme yarığı

Malzeme kesimi sonucunda, kesme işlemi yapılan bölgenin üst kısmı ile alt kısmı arasında kesme yarığı farklılıkları meydana gelebilir. 3mm'ye kadar olan malzemelerde kesme yarığı feeler çakısı ile ölçülerek belirlenebilir [13].



Şekil 3.7. Kesme yarığı ölçümü

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Deney Tasarımı ve Planı

4.1.1. Deney tasarımı

Deney tasarımı, bir sürecin incelenen kalite karakteristiğine etki eden kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini planlı olarak değiştirerek incelenen sürecin performansını etkileyecek değişken değerlerini belirlemede kullanılan bir tekniktir [35]. Bir diğer ifade ile deney tasarımı, süreçteki girdi değişkenleri üzerinde istenen değişikliklerin yapılması ile cevap değişkeni üzerindeki etkilerin elde edilmesi, gözlemlenmesi ve değerlendirilmesi olarak da tanımlanabilir [36].

Yapılacak olan çalışma için kullanılan metot, deney tasarım yöntemlerinden birisi olan yanıt yüzey (Response surface method) yöntemidir. Yanıt yüzey yöntemi girdi değerlerinin yanıt değişkeni üzerindeki etkisini ortaya koymak ve girdi değişkenlerinin kombinasyonları içerisinde cevap değişkenini en iyileyen değerleri bulmak amacıyla kullanılır. Bu yöntem değişkenler ve sonuçlar arasında ilişkinin tanımlanması için kullanılan bir dizi matematiksel ve istatistiksel teknikten oluşur. Bahsedilen tekniklerin amacı en çok istenen yanıtın değerini verecek girdi değişkenlerini belirlemektir. Yöntemin uygulanması için sonuçlar üzerinde etkisi olduğu düşünülen girdileri belirlemektir. Daha sonrasında deney tasarımı, regresyon modelleme ve optimizasyon teknikleri kullanılarak sonuca gidilir [37,38].

Deney tasarımında avantajlarının çokluğundan dolayı genellikle kullanılan deney tasarım yöntemi anlaşılma kolaylığı ve daha az deney gerektirmesi nedeniyle Taguchi metodudur. Ancak yanıt yüzey yöntemini Taguchi yöntemine göre bazı üstünlükleri vardır. Yanıt yüzey yöntemi ile daha az efor sarf ederek tasarım en iyilenebilir. Kontrol edilebilen değişkenler için Taguchi tekniği ile belirlenen faktör seviyeleri, değişkenlerde yapılabilecek herhangi bir değişiklikte tüm deney aşamalarının tekrarını gerektirir, yanıt yüzey yönteminde ise bu durum yöntemin sıralı yapısı nedeniyle sabit kalır aynı zamanda yanıt yüzey yöntemi deney tasarımının yanında matematiksel programlama ve en iyileme tekniklerinin kullanımıyla en iyi değerleri elde etmeyi sağlar [39,40].

4.1.2. Deney planının oluşturulması

Yapılacak deney için tezgâh değişkenleri kesme hızı, lazer gücü ve gaz basıncı olarak belirlenmiştir. Diğer bir değişken olan malzeme kalınlığı da eklenerek toplamda 4 adet girdi değişkeni belirlenmiştir. Bu girdi değişkenlerinin her biri için 3 farklı seviyede değerler belirlenerek deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneylerin doğruluğu ve ölçüm sonuçlarının tutarlı olup olmadığının kontrol edilebilmesi için 3 tekrarlı deney tasarım kombinasyonu Minitab19 Paket programı yardımı ile yanıt yüzey yöntemine göre “Stat / DOE / Response Surface / Create Response Surface Design” sekmesi kullanılarak oluşturulmuştur. Deney ile ilgili değişken ve sabit parametreler çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney tasarımında kullanılan parametreler

Faktörler ve Seviye Değerleri	
Faktörler	Seviye Değerleri
Parça Kalınlığı (mm)	Alt Seviye: 8 / Orta Seviye: 12 / Üst Seviye: 15
Kesme Hızı (mm/dk.)	Alt Seviye: 850 / Orta Seviye: 1000 / Üst Seviye: 1150
Lazer Gücü (Watt)	Alt Seviye: 3000 / Orta Seviye: 3500 / Üst Seviye: 4000
Gaz Basıncı (Bar)	Alt Seviye: 0,55 / Orta Seviye: 0,65 / Üst Seviye: 0,75
Nozül Mesafesi (mm)	1,5
Focus (mm)	0
Duty (%)	100
Frekans (Hz)	5000
Gaz Tipi	Oksijen
Kesilen Parça Boyutu (mm)	100x50

Çizelge 4.2. Deney planı

Deney Planı									
Parça No	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	Parça No	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)
1	15	1000	4000	0,65	34	12	1000	4000	0,55
2	15	1000	4000	0,65	35	15	1000	3500	0,75
3	15	1000	3500	0,75	36	12	1000	3500	0,65
4	8	1000	3500	0,55	37	15	1150	3500	0,65
5	12	850	3500	0,55	38	15	1150	3500	0,65
6	12	1000	3000	0,55	39	12	1000	4000	0,55
7	12	850	3500	0,75	40	15	850	3500	0,65
8	12	1150	3500	0,75	41	12	850	3000	0,65
9	12	1150	3000	0,65	42	12	1150	3500	0,75
10	12	850	3500	0,75	43	12	1000	4000	0,75
11	12	1150	3500	0,55	44	8	1000	3000	0,65
12	15	850	3500	0,65	45	12	1150	4000	0,65
13	12	1000	3000	0,55	46	15	1000	3500	0,55
14	12	1150	3000	0,65	47	12	1000	3000	0,55
15	12	850	4000	0,65	48	12	1150	3500	0,55
16	12	1150	3500	0,75	49	12	1000	3500	0,65
17	12	1000	4000	0,75	50	8	1000	3500	0,55
18	15	1000	3000	0,65	51	12	1150	3000	0,65
19	15	1000	3000	0,65	52	12	1000	3500	0,65
20	12	1000	3500	0,65	53	12	850	4000	0,65
21	15	1000	3500	0,55	54	8	1000	3000	0,65
22	15	850	3500	0,65	55	8	850	3500	0,65
23	8	1000	3500	0,75	56	12	1150	3500	0,55
24	12	850	3000	0,65	57	8	850	3500	0,65
25	12	1000	3000	0,75	58	12	1000	3500	0,65
26	12	850	3000	0,65	59	12	1000	3500	0,65
27	8	1000	4000	0,65	60	15	1150	3500	0,65
28	15	1000	4000	0,65	61	12	850	3500	0,55
29	8	1000	4000	0,65	62	12	1000	3500	0,65
30	12	1150	4000	0,65	63	12	850	3500	0,55
31	12	1000	4000	0,55	64	8	1000	4000	0,65
32	15	1000	3000	0,65	65	8	1150	3500	0,65
33	12	850	4000	0,65	66	8	1000	3500	0,55

Çizelge 4.2. (devam) Deney planı

Deney Planı									
Parça No	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	Parça No	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)
67	12	1000	3500	0,65	74	8	1000	3500	0,75
68	15	1000	3500	0,55	75	8	1150	3500	0,65
69	12	1150	4000	0,65	76	8	1000	3000	0,65
70	15	1000	3500	0,75	77	8	850	3500	0,65
71	8	1000	3500	0,75	78	12	1000	3500	0,65
72	12	1000	3000	0,75	79	12	1000	4000	0,75
73	12	850	3500	0,75	80	12	1000	3000	0,75
					81	8	1150	3500	0,65

4.2. Lazer Tezgâhı

Lazer ile kesim işlemleri, Sakarya ilinde bulunan Yılıgenci San. ve Tic. A.Ş. firması bünyesindeki Durma marka HD-F 6020 model fiber lazer tezgahında yapılmıştır.



Resim 4.1. Durma HD-F 6020 fiber lazer tezgâhı

Deneyin yapıldığı Durma marka HD-F 6020 model fiber lazer tezgâhının teknik özellikleri çizelge 4.3'te belirtilmiştir.

Çizelge 4.3. Durma fiber lazer tezgâh özellikleri

X Eksen (mm)	6150
Y Eksen (mm)	2100
Z Eksen (mm)	185
Max Sac Ölçüsü (mm)	6096x2032
Max Sac Ağırlığı (kg/m ²)	200
Çalışma Modu	CW, QCW, SW
Çıkış Gücü (W)	400-4000
Dalga Boyu Emisyonu (nm)	1070-1080
Senkronizasyon (m/dak)	170
İvmelenme (m/s ²)	28
Pozisyonlama Hassasiyeti (mm)	±0,05

4.3. Deney Malzemesi

Deney işlemleri için St-52 kalite çelik kullanılmıştır. St-52 (S355JR) genel yapı çelikleri grubunda olup genellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda yani endüstriyel yapılar, köprüler, demir yolları, gemiler gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu çelikler genellikle alaşımsız çelik olarak tanımlanırlar. Mekanik özellikleri genellikle içeriğindeki karbon miktarlarına bağlıdır.

Üretim şekilleri ve üretim hammaddeleri, içeriğindeki azot, fosfor, mangan, silisyum, bakır ve kükürt elementleri mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Malzeme isminin başındaki “st” ifadesi, %2 kadar karbon içeren genel yapı çeliği anlamında olup Almanca “stahl” kelimesinden gelmektedir. 52 ifadesi ise DIN1700 standardına göre en az 52 kgf/mm² çekme dayanımına sahip olduğunu göstermektedir [27].

Çizelge 4.4. St-52 Malzemenin kimyasal bileşimi

St-52 kimyasal Bileşimi (Max. % ağırlık)	
Karbon (c) (max.)	0,20%-0,23%
Silisyum (Si)	0,55%-0,60%
Mangan (Mn)	1,60%-1,70%
Fosfor (P)	0,035%-0,040%
Kükürt (S)	0,035%-0,040%
Bakır (Cu)	0,55%-0,60%
Azot (N)	0,008%-0,009%
Alüminyum (Al)	0,015%-0,02%

Çizelge 4.5. St-52 Malzemenin mekanik özellikleri

St-52 Mekanik Özellikleri						
	Çekme Dayanımı (Mpa)		Akma Sınırı (Mpa)		Kopma Uzaması (%)	
ST-52	<3mm	≥3mm	≤16mm	≥16mm ≤40mm	≥3mm ≤40mm	≥40mm ≤63mm
	510-680	490-630	355	345	22	21

4.4. Deneyin Yapılışı

Yapılan çalışmada, kesilecek olan farklı kalınlıktaki sac lar ayrı ayrı tezgâh tablasına yerleştirilmiştir. Çizelge 4.2.'de belirlenen plana göre oluşturulan kombinasyonda, tezgah parametreleri tek tek girilerek kesim işlemleri yapılmış ve kesilen parçalar numaralandırılarak gerekli ölçüm işlemleri için hazırlanmıştır.

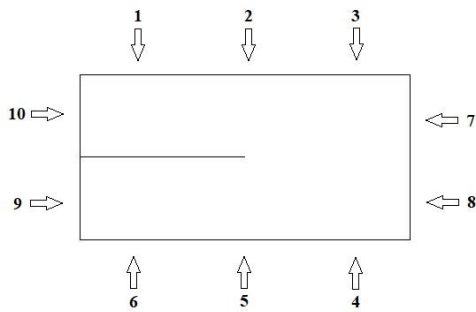


Resim 4.2. Lazer ile kesilen deney numuneleri

4.5. Bulgular

4.5.1. Yüzey pürüzlülüğü

Lazer ile kesimi yapılan parçaların yüzey pürüzlülük değerleri, Gazi Üniversitesi Toz Metalürji Laboratuvarında bulunan Tesa Technology Rugosurf 20 marka pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm işlemleri DIN ISO 9013 Standartlarına göre, malzeme kalınlığı 2mm'den büyük olduğundan dolayı, malzemenin kesim bölgesinin üst yüzeyinden 2/3'ü kadar aşağıdan yapılmıştır. Her bir kesim yüzeyinin üst kısmından itibaren 2/3 kadar mesafeden toplamda 10 ayrı noktadan ölçüm alınarak yapılmıştır. Ölçümlerin aritmetik ortalaması aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir. Ölçümler ile ilgili detaylı çizelgeler EK-1, EK-2, EK-3 ve EK-4'te mevcuttur.



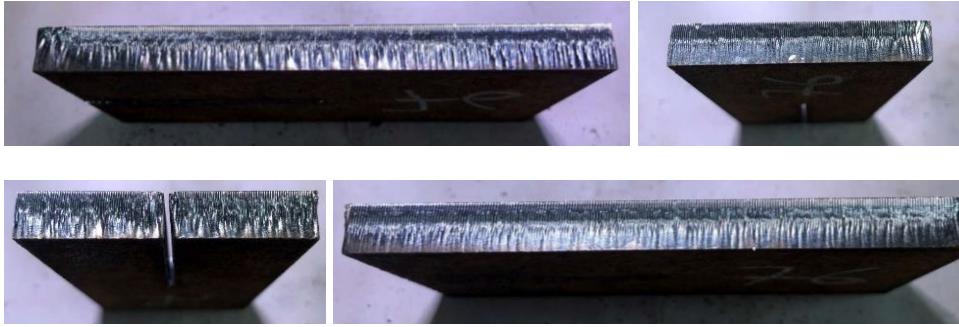
Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktaları



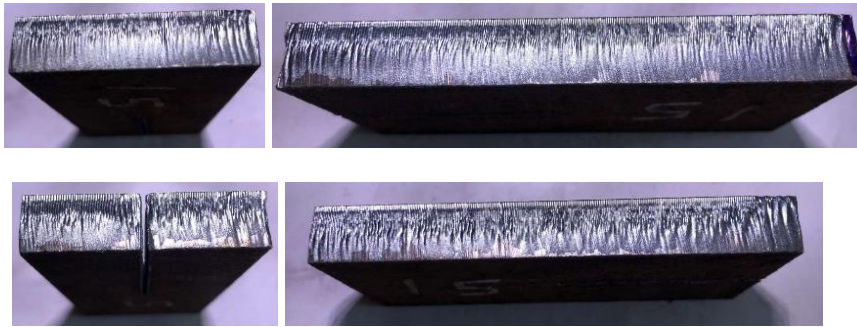
Resim 4.3. Tesa Technology Rugosurf 20 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı



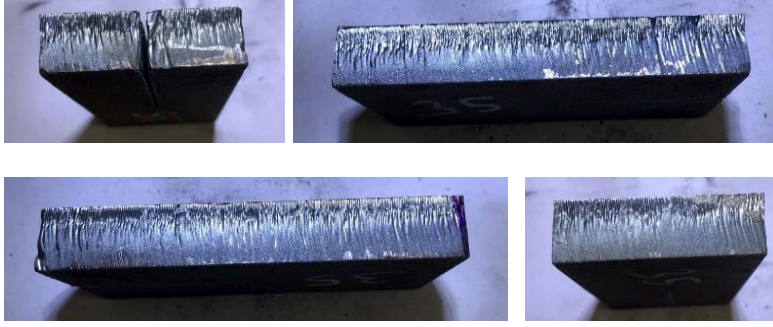
Resim 4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü



Resim 4.5. Parça no. 76 yüzey görüntüsü (kalınlık 8mm)



Resim 4.6. Parça no. 15 yüzey görüntüsü (kalınlık 12mm)



Resim 4.7. Parça no. 35 yüzey görüntüsü (kalınlık 15mm)

Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)

Her bir parçadan alınan 10 adet ölçüm sonucunun aritmetik ortalaması çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Ölçüm detayları, Ek-1'deki çizelgede yer almaktadır. Tablo üzerinde “1. Deney” ifadesi “Parça no” sütunundaki ilk parçayı, “2. Deney” ifadesi “Parça no” sütunundaki ikinci parçayı “3. Deney” ifadesi de “Parça no” sütunundaki üçüncü parçadan alınan sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.6. Ra ölçüm değerleri

No	Parça No	Değişkenler				Pürüzlülük (Ra)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	6,447	6,428	6,394
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	5,081	4,811	5,821
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	5,454	5,485	4,992
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	5,329	5,347	5,693
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	6,014	4,188	5,322
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	4,900	4,893	4,224
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	12,530	11,739	10,278
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	10,344	8,138	8,740
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	10,357	10,422	11,661
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	6,656	6,578	6,319
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	6,362	6,247	6,374
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	8,554	8,119	9,443
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	9,262	7,682	9,070
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	4,943	4,794	5,469
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	5,681	7,991	5,023
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	8,512	8,575	8,749
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	15,672	15,200	15,567
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	5,181	5,628	6,004
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	5,120	6,811	7,741
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	5,555	4,926	6,100
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	4,381	5,272	5,545
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	4,988	5,062	4,715
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	14,055	12,643	11,556
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	6,613	6,519	6,171
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	5,338	6,510	5,029
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	7,521	6,721	7,779
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	12,244	10,960	11,955

Elde edilen değerleri kullanarak optimum ortalama yüzey pürüzlülük değerinin (Ra) bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.7. Ra değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	6,00839	0,240	25,01	0,000	
Kalınlık	-2,92252	0,119	-24,65	0,000	1,01
Hız	-1,84208	0,120	-15,33	0,000	1,03
Lazer Gücü	0,03879	0,120	0,32	0,748	1,03
Basınc	0,69370	0,120	5,77	0,000	1,03
Kalınlık*Kalınlık	2,50341	0,182	13,73	0,000	1,26
Hız*Hız	0,90732	0,178	5,10	0,000	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	0,09319	0,178	0,52	0,602	1,25
Basınc*Basınc	0,17174	0,178	0,97	0,338	1,25
Kalınlık*Hız	1,70002	0,204	8,34	0,000	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	-0,11571	0,204	-0,57	0,572	1,03
Kalınlık*Basınc	-0,21862	0,204	-1,07	0,288	1,03
Hız*Lazer Gücü	0,03988	0,205	0,19	0,847	1,00
Hız*Basınc	-0,21976	0,205	-1,07	0,288	1,00
Lazer Gücü*Basınc	-0,06687	0,205	-0,33	0,746	1,00

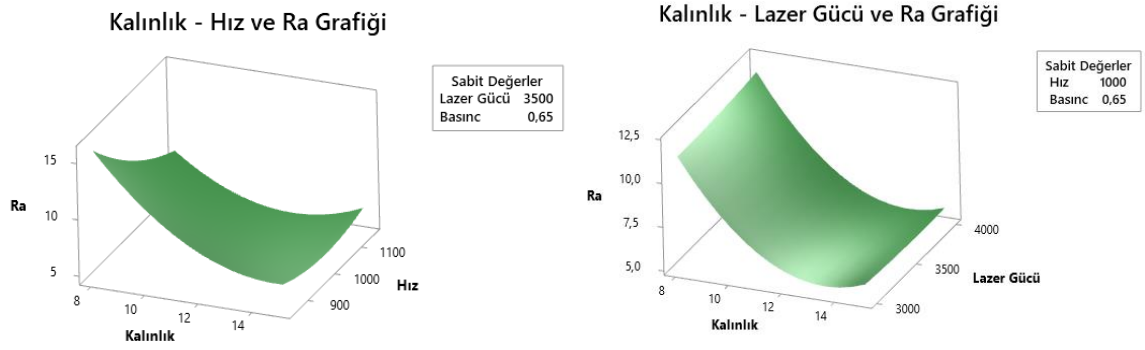
Çizelge 4.8. Ra değerleri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,711317	94,85%	93,76%	92,37%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerleri yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Ra ortalama pürüzlülük değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

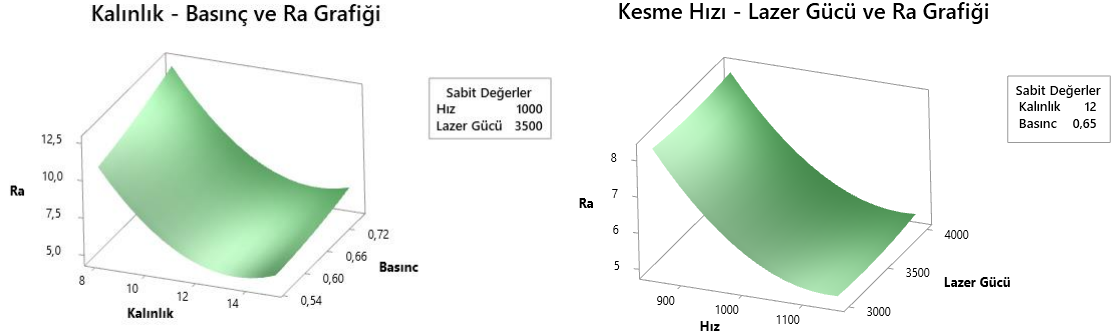
$$Ra = 6,00839 - 2,92252x_1 - 1,84208x_2 + 0,03879x_3 + 0,69370x_4 + 2,50341x_1^2 + 0,90732x_2^2 + 1,70002x_1x_2 \quad (\text{Eş. 4.1})$$

Denklemden x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



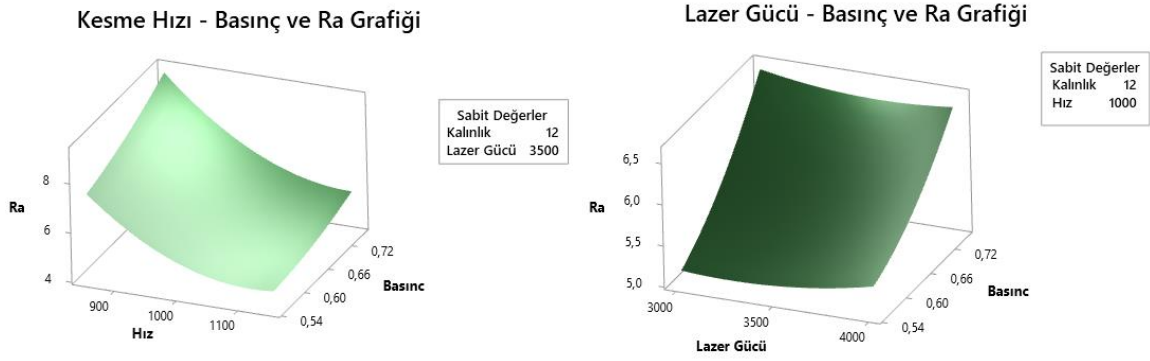
Şekil 4.2. Ra için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık-lazer gücü grafiği

Grafik incelendiğinde sabit lazer gücü ve sabit basınç altında Ra pürüzlülük değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Düşük kalınlıklarda farkın daha da belirginleştiği gözlemlenmektedir. Kalınlık – Lazer Gücü ve Ra grafiği incelendiğinde ise sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında Ra değerinin kalınlık arttıkça azaldığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça özellikle düşük kalınlıklarda yüzey pürüzlülüğü değeri azalmaktadır.



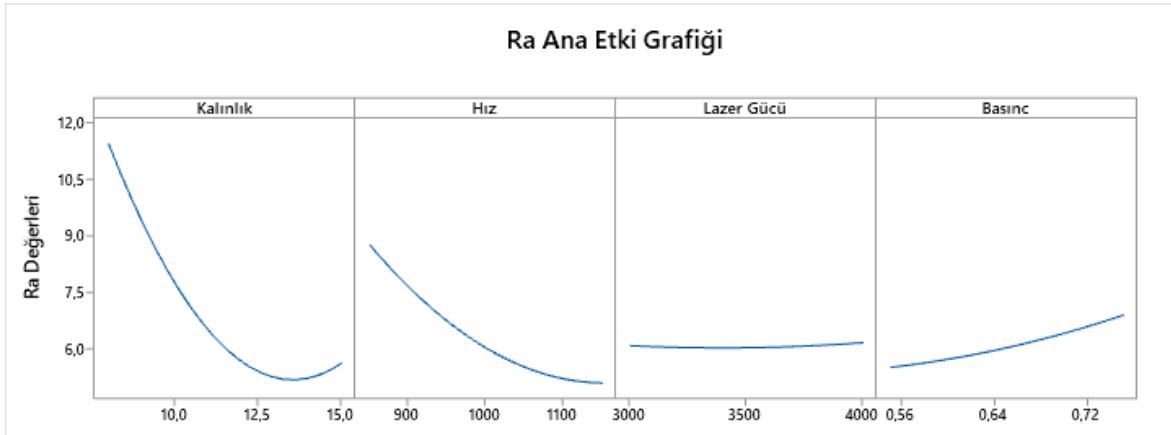
Şekil 4.3. Ra için kalınlık-basınç ve kesme hızı-lazer gücü grafiği

Kalınlık–basınc ve Ra grafiği incelendiğinde sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında Ra değerinin kalınlık ile ters orantılı olduğu ve yardımcı gaz basıncı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer grafikte ise sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında Ra değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün kesme hızı kadar etkisi gözlemlenmese de lazer gücünün azalması ile yüzey pürüzlülüğü az da olsa azalmaktadır.



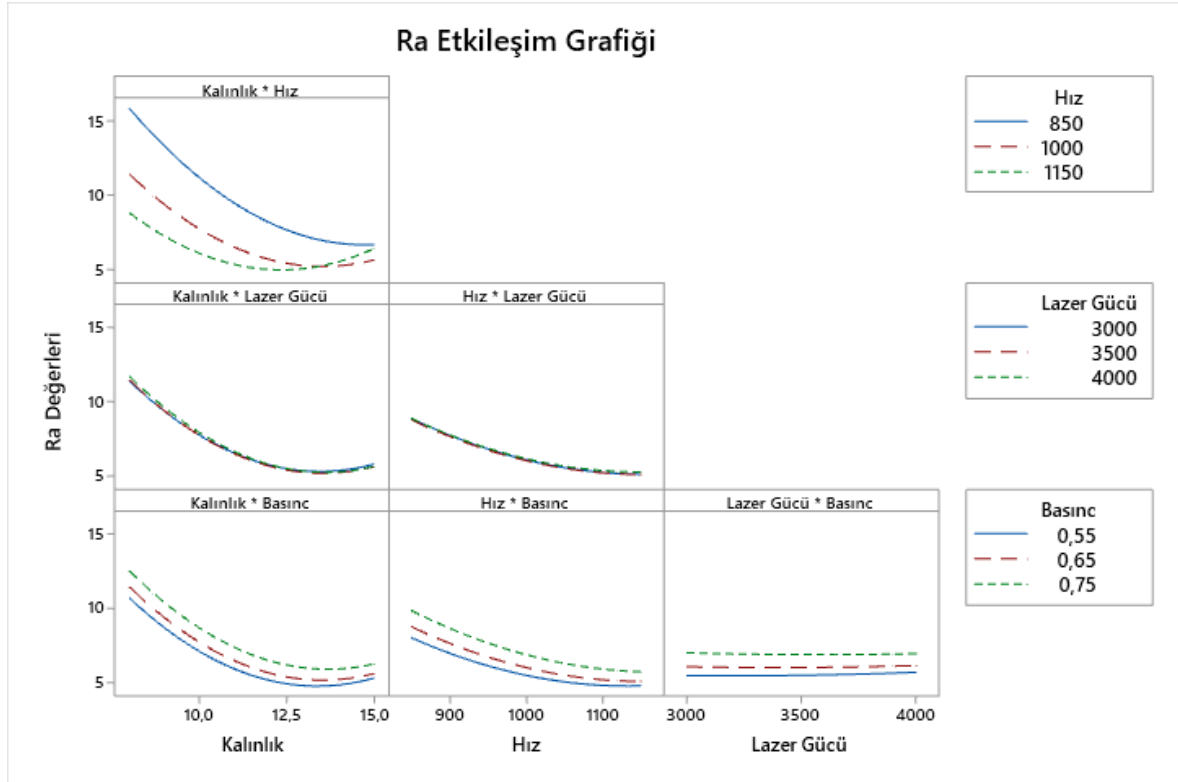
Şekil 4.4. Ra için kesme hızı–basıncı ve lazer gücü basınç grafiği

Şekil 4.4. incelendiğinde sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında Ra değerinin şekil 4.3'te olduğu gibi kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Yine aynı şekilde yardımcı gaz basıncı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Diğer grafikte ise, lazer gücünün ve yardımcı gaz basıncının sabit tutulduğu durumlarda Ra değerinin basıncın azalması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi daha azdır ancak lazer gücü azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı söylenebilir.



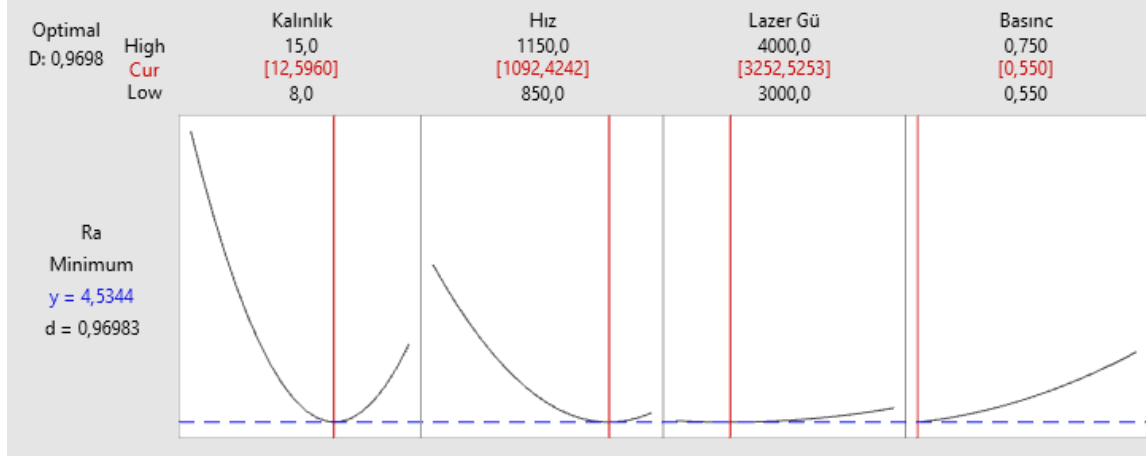
Şekil 4.5. Ra değeri ana etki grafiği

Ra değeri için ana etkilerin gösterildiği grafiğe baktığımızda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin yukarıdaki yorumlar ile paralel olarak kalınlık ve kesme hızı ile azaldığı, lazer gücünün etkisinin olmadığı, yardımcı gaz basıncı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin doğru orantılı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. Ra etkileşim grafiği

Tüm değerler göz önüne alındığında, kalite bakımından yüzey pürüzlülüğünün mümkün olan en düşük değerde olması istenmektedir. Bunun için Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğünün en küçüklmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük Ra değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Programdan elde edilen çıktılara göre Kalınlık: 12,59 mm, Kesme Hızı: 1092,42 mm/dk., Lazer Gücü: 3252,52 Watt, Yardımcı gaz basıncı: 0,55 bar değerlerinde seçildiğinde Ra değerinin 4,5344 μm olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.7. Ra optimizasyon grafiği

Kuadratik Ortalama Pürüzlülük Değeri (Rq)

Her bir parçadan alınan 10 adet ölçüm sonucu olan kuadratik ortalama pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalaması çizelge 5.9’da gösterilmiştir. Ölçüm detayları Ek-2’teki çizelge 5.29’da de yer almaktadır. Tablo üzerinde “1. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ilk parçayı, “2. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ikinci parçayı “3. Deney” ifadesi de parça numaraları sütunundaki üçüncü parçadan alınan sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.9. Kuadratik ortalama pürüzlülük değerleri

Deney No	Parça No	Değişkenler				Pürüzlülük (Rq)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	7,871	8,215	7,887
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	6,272	5,878	6,982
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	6,767	6,697	6,166
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	6,476	6,597	6,995
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	7,274	5,183	6,632
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	6,059	6,085	5,270
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	14,959	14,437	12,652
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	12,790	9,866	10,582
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	12,948	12,857	14,468
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	8,087	8,116	7,644
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	7,704	7,952	7,683
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	10,352	9,880	11,586
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	11,280	9,464	11,000
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	6,121	5,923	6,661
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	6,978	9,909	6,068
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	10,413	10,436	10,597
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	19,223	18,857	19,348
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	6,444	6,954	7,327
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	6,380	8,430	9,289
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	6,808	6,056	7,410
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	5,471	6,448	6,774
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	6,164	6,272	5,815
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	17,187	15,523	15,113
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	8,172	7,924	7,484
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	6,540	8,082	6,245
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	9,252	8,336	9,636
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	15,049	13,141	14,738

Elde edilen değerleri kullanarak optimum kuadratik ortalama yüzey pürüzlülük değerinin (Rq) bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” Sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.10. Rq değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	7,40160	0,285	25,95	0,000	
Kalınlık	-3,61933	0,141	-25,71	0,000	1,01
Hız	-2,26268	0,143	-15,86	0,000	1,03
Lazer Gücü	0,03715	0,143	0,26	0,795	1,03
Basınc	0,86102	0,143	6,04	0,000	1,03
Kalınlık*Kalınlık	3,07884	0,217	14,22	0,000	1,26
Hız*Hız	1,08147	0,211	5,12	0,000	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	0,06979	0,211	0,33	0,742	1,25
Basınc*Basınc	0,25641	0,211	1,21	0,229	1,25
Kalınlık*Hız	2,14194	0,242	8,85	0,000	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	-0,15676	0,242	-0,65	0,520	1,03
Kalınlık*Basınc	-0,30802	0,242	-1,27	0,208	1,03
Hız*Lazer Gücü	0,03893	0,244	0,16	0,874	1,00
Hız*Basınc	-0,26282	0,244	-1,08	0,285	1,00
Lazer Gücü*Basınc	-0,08928	0,244	-0,37	0,715	1,00

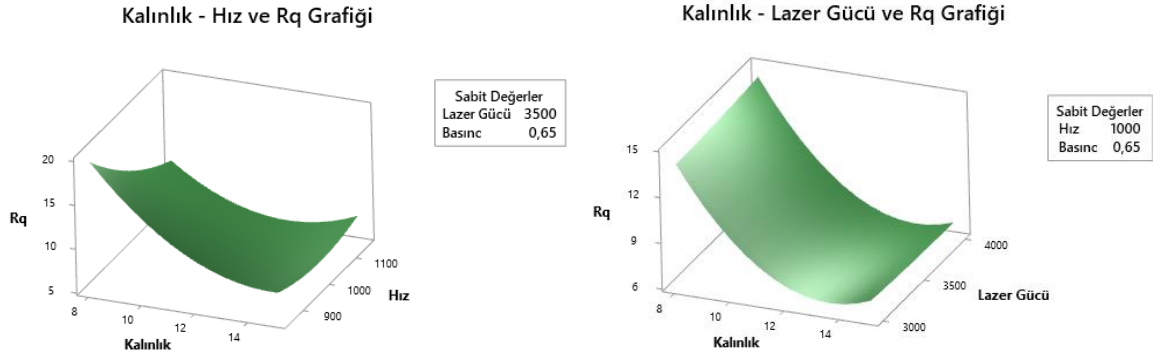
Çizelge 4.11. Rq değerleri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,844517	95,23%	94,21%	92,98%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Rq ortalama pürüzlülük değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

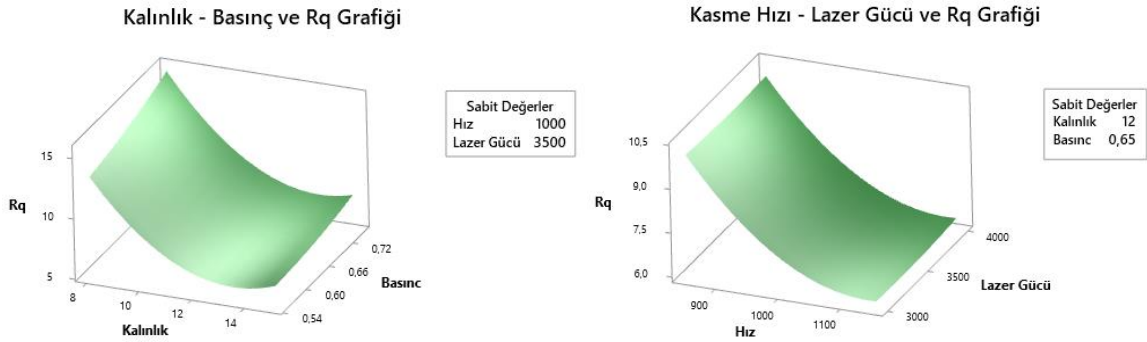
$$Rq = 7,40160 - 3,61933x_1 - 2,26268x_2 + 0,03715x_3 + 0,86102x_4 + 3,07884x_1^2 + 1,08147x_2^2 + 2,14194x_1x_2 \quad (\text{Eş. 4.2})$$

Eşitlikte x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



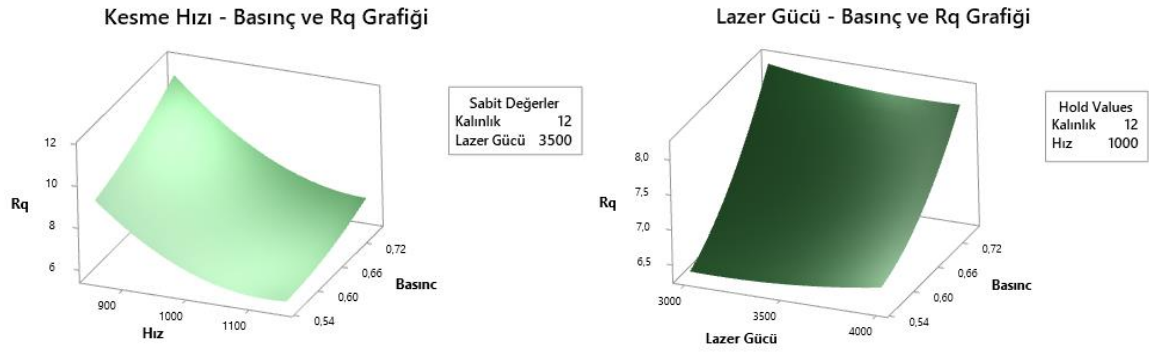
Şekil 4.8. Rq için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık-lazer gücü grafiği

Kalınlık–hız ve Rq grafiğine bakıldığında Rq değerinin kalınlık arttıkça azaldığı ve özellikle düşük kalınlıklarda kesme hızı arttıkça azaldığı görülmektedir. Diğer grafik incelendiğinde ise sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında Rq değerinin kalınlık arttıkça azaldığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça özellikle düşük kalınlıklarda yüzey pürüzlülüğü Rq değeri azalmaktadır.



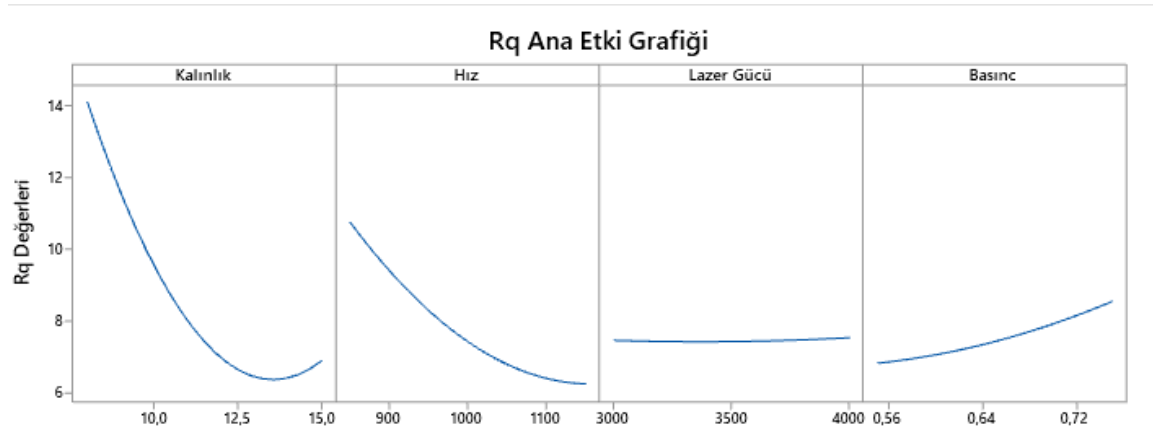
Şekil 4.9. Rq için kalınlık–basıncı ve kesme hızı–lazer gücü grafiği

Şekil 4.9'a göre sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında Rq değerinin kalınlık ile ters orantılı olduğu ve yardımcı gaz basıncı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Kesme hızı ve Lazer gücü ile ilgili grafikte ise sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında Rq değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün kesme hızı kadar etkisi gözlemlenmese de lazer gücünün azalması ile yüzey pürüzlülüğü Rq değeri az da olsa azalmaktadır.



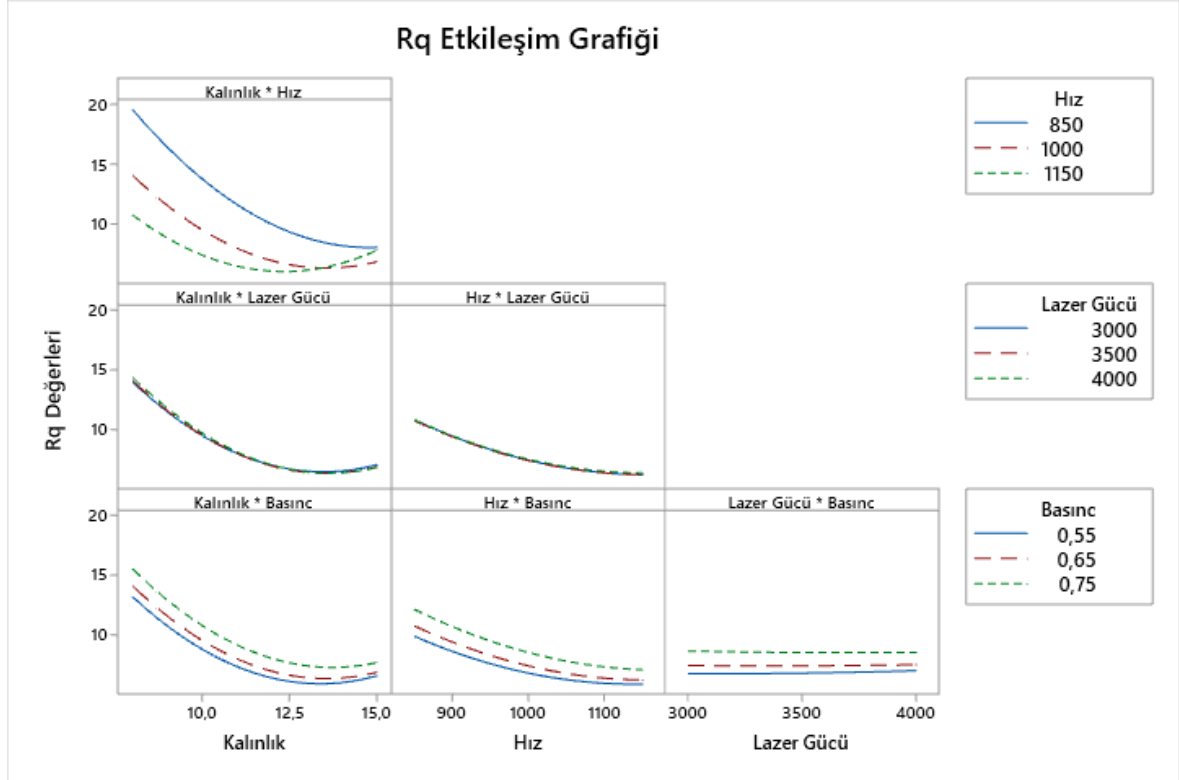
Şekil 4.10. Rq için kesme hızı–basıncı ve lazer gücü–basıncı grafiği

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında Rq değerinin şekil 4.9’da olduğu gibi kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Yine aynı şekilde yardımcı gaz basıncı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü Rq değeri azalmaktadır. Lazer gücü–basıncı grafiğine bakıldığında lazer gücünün ve yardımcı gaz basıncının sabit tutulduğu durumlarda Rq değerinin basıncın azalması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi daha azdır ancak lazer gücü azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı söylenebilir.



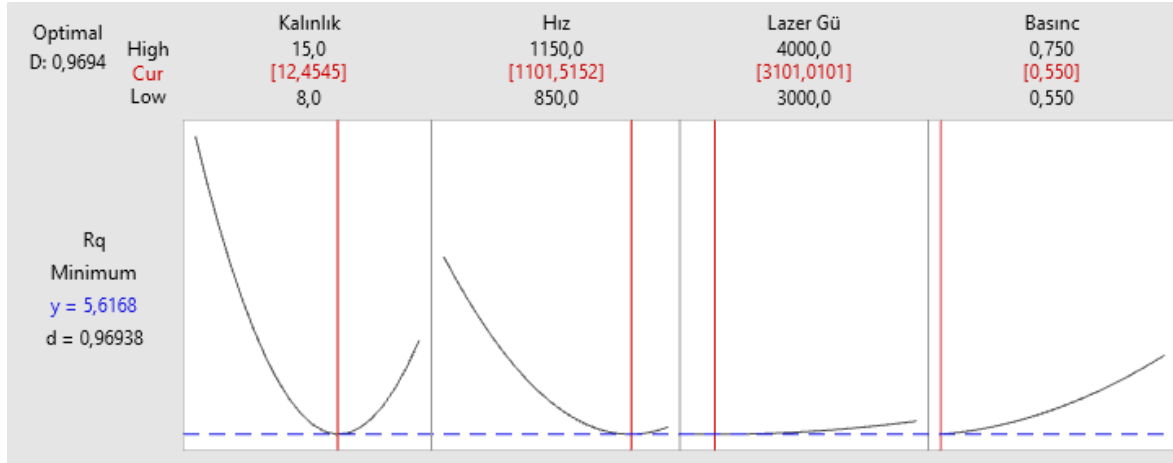
Şekil 4.11. Rq ana etki grafiği

Rq değeri için ana etkilerin gösterildiği grafiğe baktığımızda kuadratik ortalama pürüzlülük değerlerinin yukarıdaki yorumlar ile paralel olarak kalınlık ve kesme hızının artması ile azaldığı, lazer gücünün gözle görülür bir etkisinin olmadığı, yardımcı gaz basıncının artması ile Rq değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.12. Rq etkileşim grafiği

Değerler göz önüne alındığında, kalite bakımından yüzey pürüzlülüğünün mümkün olan en düşük değerde olması için Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece kuadratik ortalama yüzey pürüzlülüğünün en küçüklenmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük Rq değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Programdan elde edilen çıktılara göre kalınlık:12,45 mm, kesme Hızı:1101,51 mm/dk., lazer Gücü:3101,01 Watt, yardımcı gaz basıncı:0,55 bar değerlerinde seçildiğinde Rq değerinin 5,6168 μ m olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.13. Rq optimizasyon grafiği

Maksimum Pürüz Derinliği (Rt)

Her bir parçadan alınan 10 adet ölçüm sonucunun maksimum pürüz derinliklerinin ortalaması çizelge 5.12’de gösterilmiştir. Ölçüm detayları Ek-3’teki çizelge 5.30’da yer almaktadır. Tablo üzerinde “1. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ilk parçayı, “2. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ikinci parçayı “3. Deney” ifadesi de parça numaraları sütunundaki üçüncü parçadan alınan sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.12. Maksimum pürüz derinliği değerleri

Deney No	Parça No	Değişkenler				Pürüzlülük (Rt)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	45,489	52,455	46,744
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	37,861	33,361	39,729
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	38,472	39,055	34,676
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	35,875	38,962	39,426
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	38,868	31,663	40,378
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	33,657	35,226	30,976
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	75,378	72,344	67,516
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	69,906	56,008	61,076
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	75,465	66,072	71,475
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	46,824	46,106	42,296
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	43,974	48,638	44,284
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	55,983	56,501	68,326
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	58,577	54,063	57,262
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	36,243	34,057	38,214
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	42,184	58,462	33,905
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	56,191	59,857	58,213
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	102,081	100,908	104,490
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	38,564	41,591	43,761
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	38,562	49,977	52,654
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	38,811	34,083	43,709
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	31,841	37,081	39,423
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	36,205	37,209	33,176
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	93,632	91,611	93,325
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	46,640	44,735	40,342
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	40,160	47,967	39,085
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	56,831	47,048	54,060
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	74,825	65,510	77,850

Elde edilen değerleri kullanarak optimum yani en az maksimum pürüz derinliği değerinin (Rt) bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.13. Rt değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	43,40122	1,70	25,57	0,000	
Kalınlık	-17,88516	0,838	-21,35	0,000	1,01
Hız	-12,21957	0,849	-14,40	0,000	1,03
Lazer Gücü	0,02047	0,849	0,02	0,981	1,03
Basınc	5,90248	0,849	6,95	0,000	1,03
Kalınlık*Kalınlık	14,48866	1,29	11,24	0,000	1,26
Hız*Hız	4,97228	1,26	3,96	0,000	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	-0,66495	1,26	-0,53	0,598	1,25
Basınc*Basınc	2,09819	1,26	1,67	0,100	1,25
Kalınlık*Hız	11,60758	1,44	8,05	0,000	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	-1,11439	1,44	-0,77	0,442	1,03
Kalınlık*Basınc	-3,47665	1,44	-2,41	0,019	1,03
Hız*Lazer Gücü	-0,18581	1,45	-0,13	0,898	1,00
Hız*Basınc	-1,02558	1,45	-0,71	0,482	1,00
Lazer Gücü*Basınc	-0,86647	1,45	-0,60	0,552	1,00

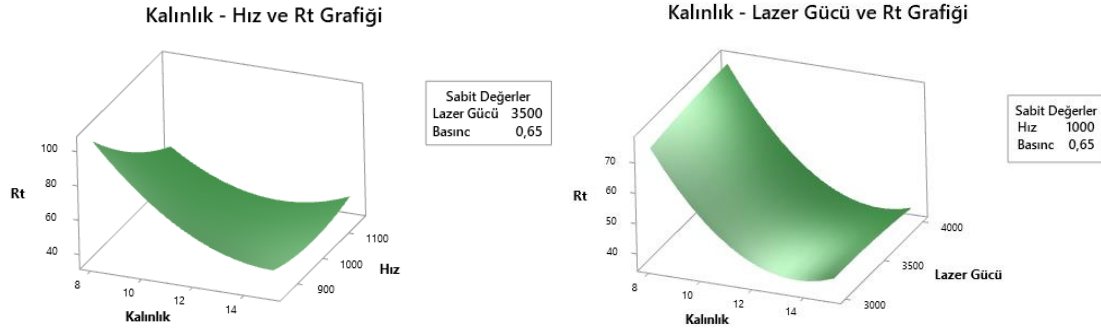
Çizelge 4.14. Rt değerleri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5,02602	93,55%	92,19%	90,55%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Rt maksimum pürüz yüksekliği değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

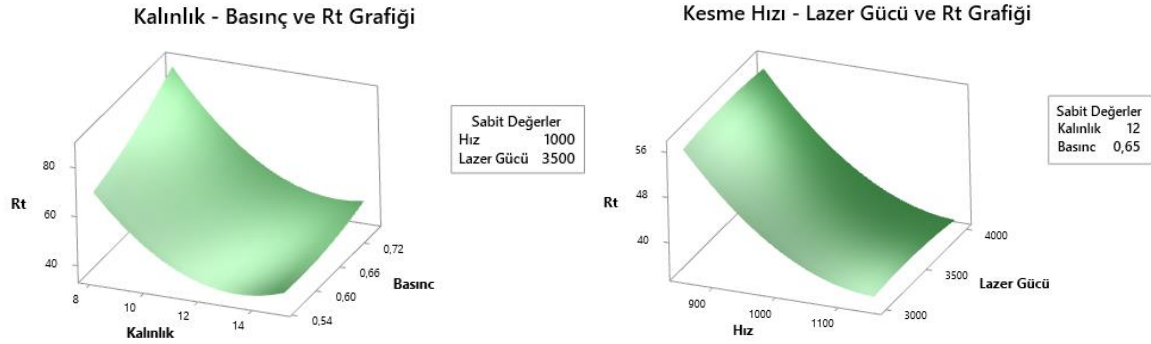
$$R_t = 43,40122 - 17,88516x_1 - 12,21957x_2 + 0,02047x_3 + 5,90248x_4 + 14,48866x_1^2 + 4,97228x_2^2 + 11,60758x_1x_2 - 3,47665x_1x_4 \quad (\text{Eş. 4.3})$$

Denklemden x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



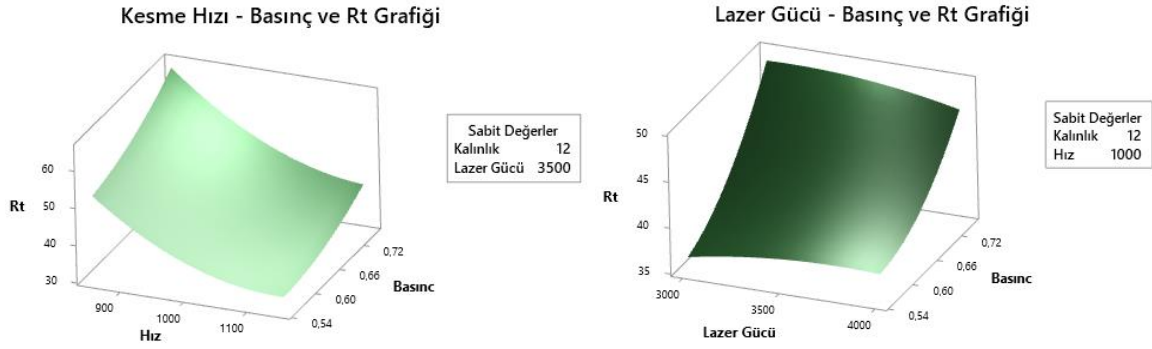
Şekil 4.14. Rt için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık lazer gücü grafiği

Grafiğe bakıldığında Rt değerinin kalınlık ile ters orantılı olduğu ve özellikle düşük kalınlıklarda belirgin şekilde görüldüğü üzere kesme hızı azaldıkça azaldığı görülmektedir. Kalınlık ve lazer gücü ile ilgili ikinci grafikte ise sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında Rt değerinin kalınlık arttıkça azaldığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça özellikle düşük kalınlıklarda yüzey pürüzlülüğü Rt değeri azalmaktadır.



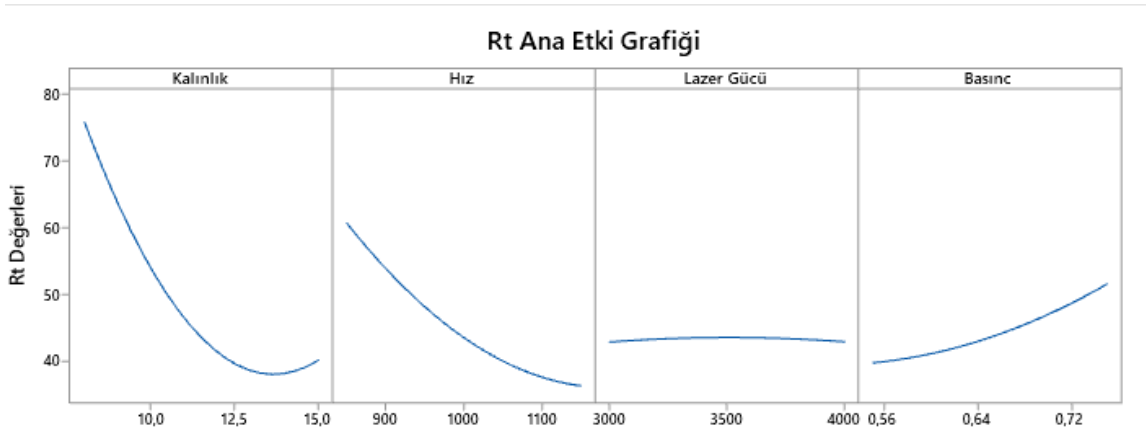
Şekil 4.15. Rt için kalınlık–basıncı ve kesme hızı–lazer gücü grafiği

Şekil 4.15. incelendiğinde sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında Rt değerinin kalınlık ile ters orantılı olduğu ve yardımcı gaz basıncı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer grafikte ise sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında Rt değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün kesme hızı kadar etkisi gözlemlenmese de lazer gücünün azalması ile maksimum pürüz derinliği Rt değeri az da olsa azalmaktadır.



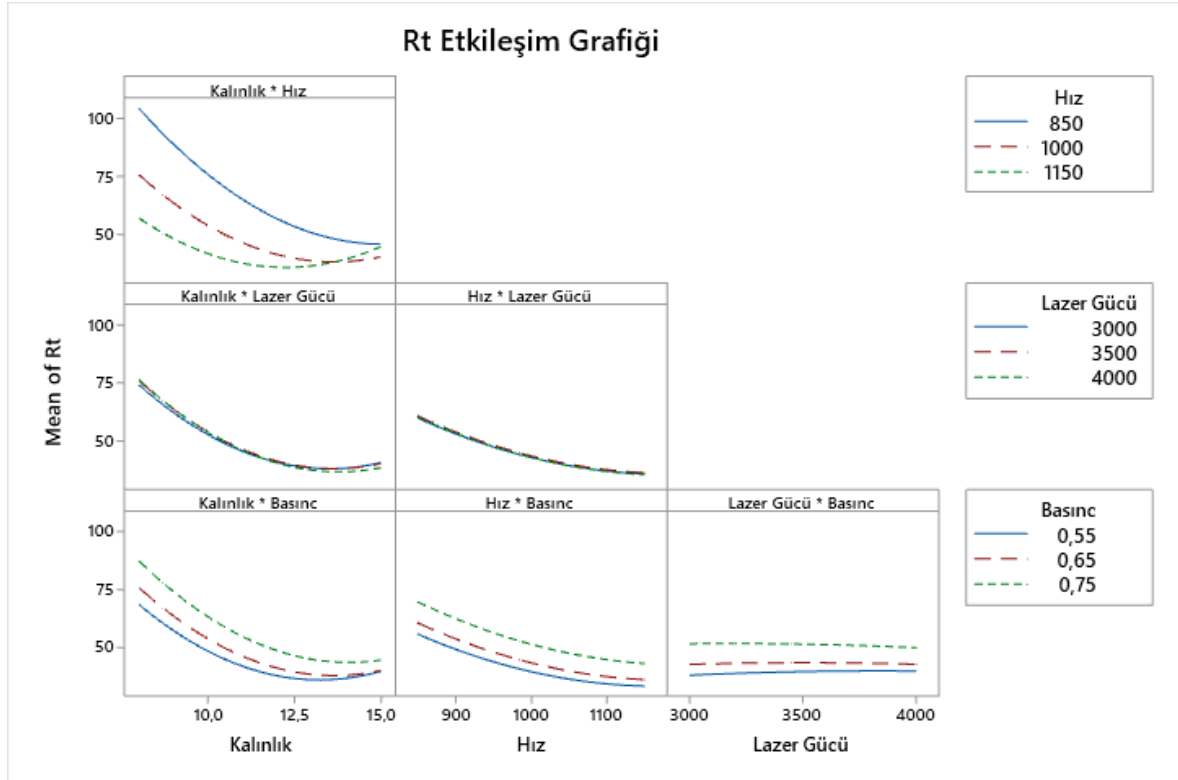
Şekil 4.16. Rt için kesme hızı-basınç ve lazer gücü-basınç grafiği

Şekil 4.16.'daki grafiklerde görüldüğü gibi, sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında Rt değerinin şekil 4.15.'te olduğu gibi kesme hızının artması ile azaldığı belirgin olarak tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde, yardımcı gaz basıncı değeri azaldıkça maksimum pürüz derinliği (Rt) değeri azalmaktadır. Lazer gücü ve basınç grafiğine bakıldığında malzeme kalınlığı ve kesme hızının sabit olduğu durumlarda Rt değerinin basıncın azalması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün gaz basıncına oranla etkisi daha azdır ancak lazer gücü azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı söylenebilir.



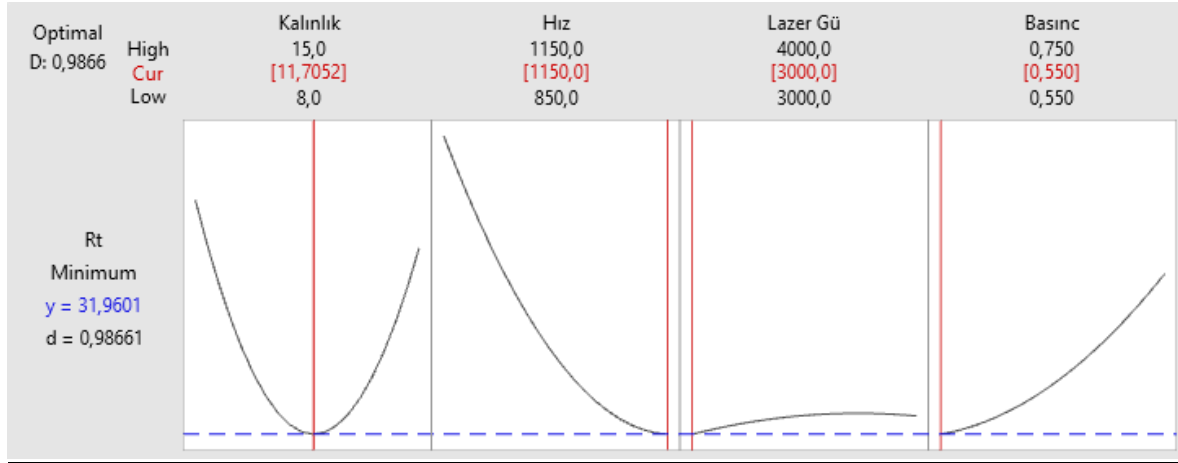
Şekil 4.17. Rt ana etki grafiği

Rt değeri için ana etkilerin gösterildiği grafiğe baktığımızda maksimum pürüz derinliği değerlerinin yukarıdaki yorumlar ile paralel olarak kalınlık ve kesme hızının artması ile azaldığı, lazer gücünün gözle görülür bir etkisinin olmadığı, yardımcı gaz basıncının artması ile Rq değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.18. Rt etkileşim grafiği

Tüm değerler göz önüne alındığında, yüzey pürüzlülüğünün mümkün olan en düşük değerde olması için Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece maksimum pürüz derinliğinin (Rt) en küçüklenmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük Rt değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Programdan elde edilen çıktılarına göre kalınlık:11,70 mm, kesme Hızı:1150,0 mm/dk., lazer Gücü:3000 Watt, yardımcı gaz basıncı:0,55bar değerlerinde seçildiğinde Rt değerinin 31,96 μm olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.19. Rt optimizasyon grafiği

Ortalama Pürüz Derinliği (Rz)

Ortalama pürüz derinliği, diğer pürüzlülük değerleri ile aynı şekilde ölçülmüştür. Her bir parçadan alınan 10 adet ölçüm sonucunun maksimum pürüz derinliklerinin ortalaması çizelge 4.15'te gösterilmiştir. Ölçüm detayları Ek-4 teki çizelgede yer almaktadır. Tablo üzerinde “1. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ilk parçayı, “2. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ikinci parçayı “3. Deney” ifadesi de parça numaraları sütunundaki üçüncü parçadan alınan sonuçları göstermektedir.

Çizelge 4.15. Ortalama pürüz derinliği değerleri

Deney No	Parça No	Değişkenler				Pürüzlülük (Rz)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	30,778	33,960	31,192
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	26,844	25,186	31,896
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	29,816	28,995	27,272
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	28,257	29,906	30,740
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	28,728	22,744	27,649
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	26,117	26,247	23,360
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	54,616	52,798	46,835
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	48,825	37,298	42,494
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	48,117	47,544	52,399
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	34,258	35,574	34,073
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	30,556	33,555	31,162
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	40,739	37,422	44,557
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	40,123	34,255	41,260
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	26,357	25,606	27,533
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	28,972	40,821	24,216
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	39,609	39,082	39,451
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	72,709	71,504	74,128
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	29,486	29,783	32,674
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	28,843	36,508	37,103
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	27,772	24,441	30,358
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	24,087	27,036	26,535
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	26,135	25,974	25,296
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	62,689	57,822	59,780
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	34,051	32,659	31,566
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	26,944	33,330	26,592
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	36,878	33,945	37,683
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	54,894	47,626	53,697

Elde edilen değerleri kullanarak optimum yani en az ortalama pürüz derinliği değerinin (Rz) bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.16. Rz değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	30,29460	1,04	29,14	0,000	
Kalınlık	-11,14537	0,513	-21,73	0,000	1,01
Hız	-8,08853	0,520	-15,56	0,000	1,03
Lazer Gücü	0,27646	0,520	0,53	0,597	1,03
Basınc	3,00264	0,520	5,78	0,000	1,03
Kalınlık*Kalınlık	11,15824	0,789	14,14	0,000	1,26
Hız*Hız	3,54811	0,769	4,61	0,000	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	-0,21449	0,769	-0,28	0,781	1,25
Basınc*Basınc	1,00413	0,769	1,30	0,196	1,25
Kalınlık*Hız	9,02777	0,883	10,23	0,000	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	-0,56650	0,883	-0,64	0,523	1,03
Kalınlık*Basınc	-1,67266	0,883	-1,90	0,062	1,03
Hız*Lazer Gücü	-0,23831	0,889	-0,27	0,789	1,00
Hız*Basınc	-1,10537	0,889	-1,24	0,218	1,00
Lazer Gücü*Basınc	-0,57723	0,889	-0,65	0,518	1,00

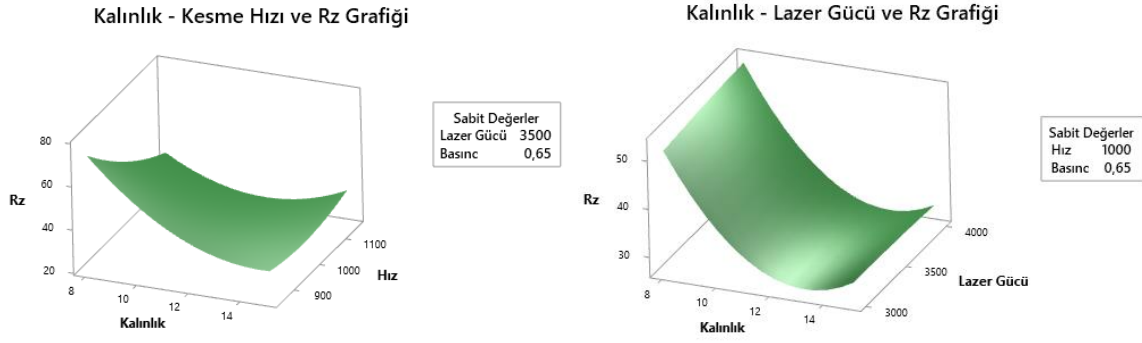
Çizelge 4.17. Rz değeri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,07798	94,45%	93,28%	91,93%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Rz ortalama pürüz derinliği değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

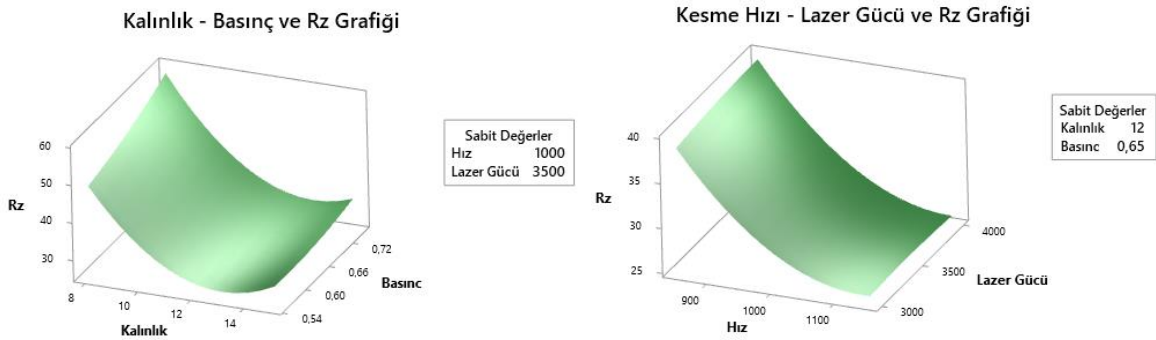
$$Rz = 30,29460 - 11,14537x_1 - 8,08853x_2 + 0,27646x_3 + 3,00264x_4 + 11,15284x_1^2 + 3,54811x_2^2 + 9,02777x_1x_2 \quad (\text{Eş. 4.4})$$

Eşitlikte x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



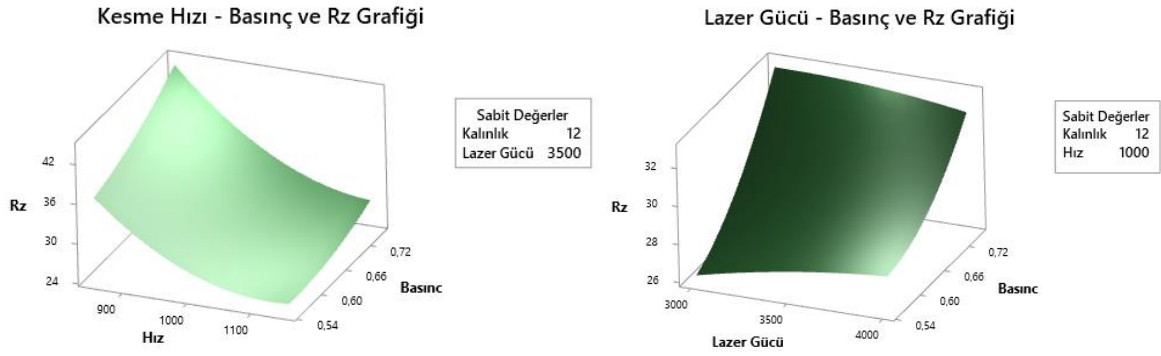
Şekil 4.20. Rz için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği

Grafiğe bakıldığında Rz değerinin kalınlık arttıkça azaldığı ve özellikle düşük kalınlıklarda kesme hızı azaldıkça azaldığı görülmektedir. Yani ortalama pürüz derinliği Rz değerinin kalınlık ile ve kesme hızı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Diğer grafiğe bakıldığında sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında Rz değerinin kalınlık arttıkça azaldığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça özellikle düşük kalınlıklarda yüzey pürüzlülüğü Rz değeri azalmaktadır.



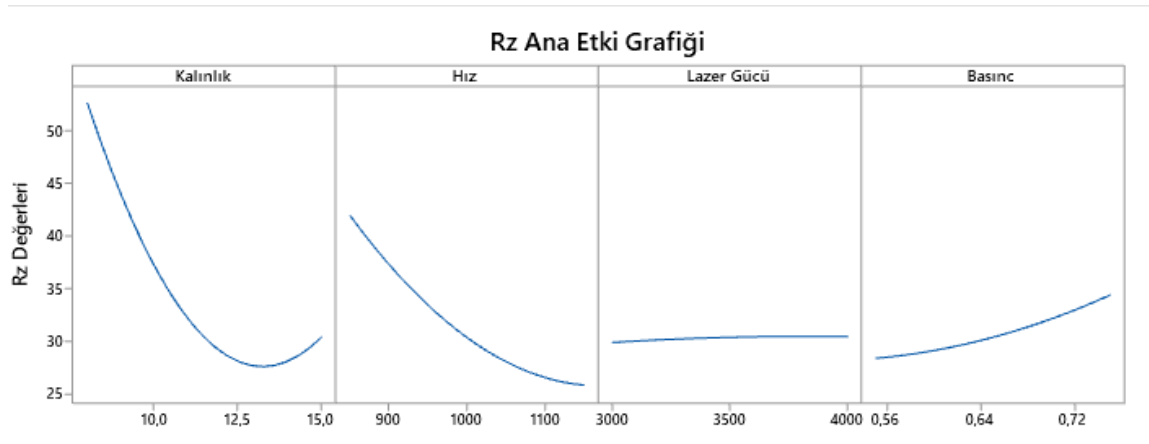
Şekil 4.21. Rz için kalınlık–basıncı ve kesme hızı–lazer gücü grafiği

Şekil 4.21’de bulunan grafikler incelendiğinde sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında Rz değerinin kalınlık ile ters orantılı olduğu ve yardımcı gaz basıncı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Diğer grafik incelendiğinde sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında ortalama pürüz değeri (Rz) değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün kesme hızı kadar etkisi gözlemlenmese de lazer gücünün azalması ile yüzey pürüzlülüğü Rz değeri az da olsa azalmaktadır.



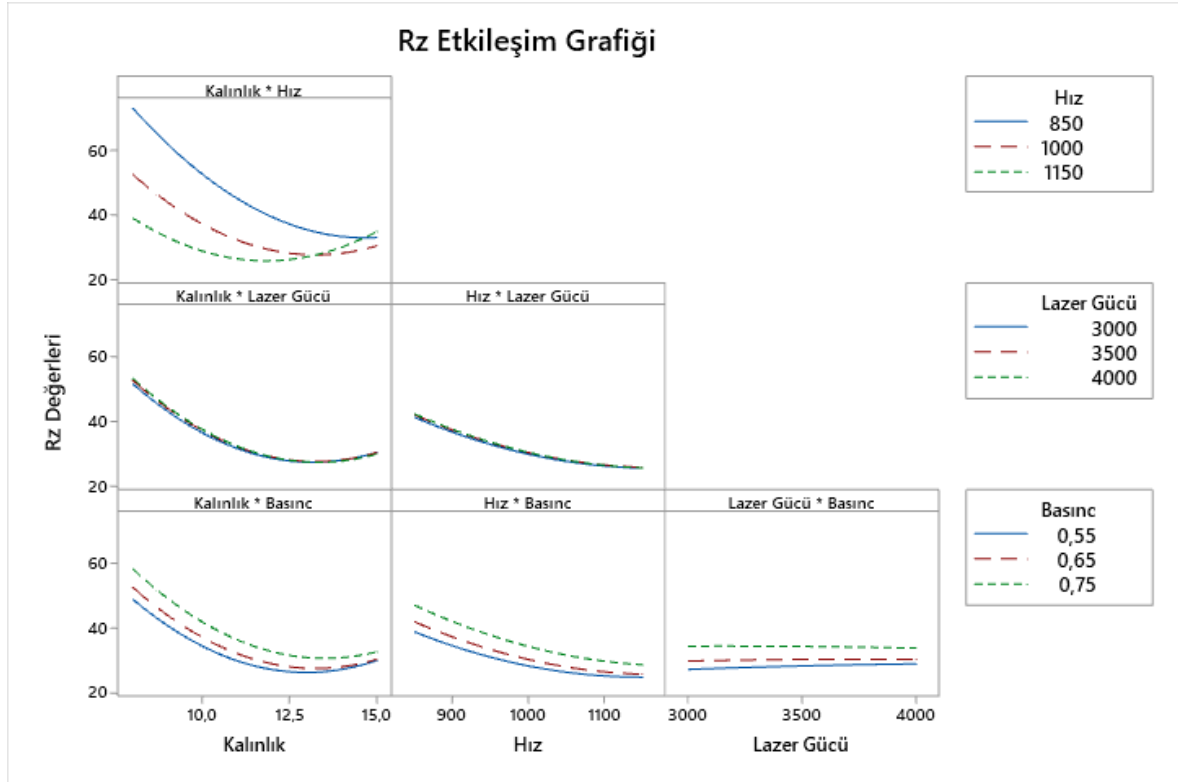
Şekil 4.22. Rz için kesme hızı-basıncı ve lazer gücü-basıncı grafiği

Sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında kesilen numunelerin Rz değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Yine aynı şekilde yardımcı gaz basıncı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü Rz değeri azalmaktadır. Diğer grafiğe bakıldığında kalınlık ve kesme hızının sabit tutulduğu durumlarda Rz değerinin basıncın azalması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi daha azdır ancak lazer gücü azaldıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı söylenebilir.



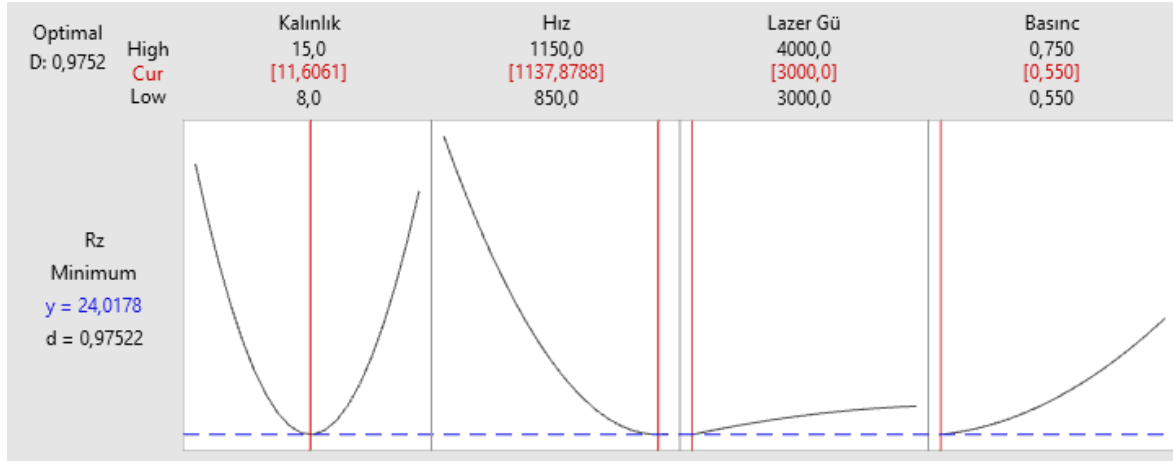
Şekil 4.23. Rz ana etki grafiği

Rz değeri için ana etkilerin gösterildiği grafiğe baktığımızda ortalama pürüz derinliği değerlerinin yukarıdaki yorumlar ile paralel olarak kalınlık ve kesme hızının artması ile azaldığı, lazer gücünün gözle görülür bir etkisinin olmadığı, yardımcı gaz basıncının artması ile Rz değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.24. Rz etkileşim grafiği

Değerler göz önüne alındığında, kalite bakımından yüzey pürüzlülüğünün mümkün olan en düşük değerde olması istenmektedir. Bunun için Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece ortalama pürüz derinliğinin (Rz) en küçükleme için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük Rz değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Programdan elde edilen çıktılarına göre kalınlık:11,60 mm, kesme hızı:1137,87 mm/dk., lazer Gücü:3000 Watt, yardımcı gaz basıncı:0,55 bar değerlerinde seçildiğinde Rz değerinin 24,01 μm olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.25. Rz optimizasyon grafiği

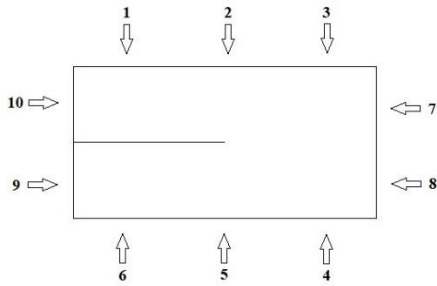
4.5.2. Yüzey sertliği

Kesilen parçaların ısı ile etkileşiminden dolayı kesim yüzeylerindeki makro sertlik miktarı Rockwell sertlik ölçüm metodu ile ölçülmüştür. Testlerin uygulama kolaylığı diğer sertlik ölçüm metodlarına nazaran daha hızlı sonuçlar alınabilme özelliği ile bu ölçüm metodu seçilmiştir. Rockwell ölçüm metodu 120^0 elmas koni uç veya çeşitli çaptaki bilya uçlarının batma derinliğinin ölçülmesi esasına dayanır. Yöntemde test edilecek malzemeye göre uygun uç seçilerek 10kgf'lik bir ön yük uygulanır. Bunun amacı malzemedeki oksit, tufal vb. kalınlıkların ölçüm sonuçlarını etkilememesidir. Numunelerin ölçümleri Gazi Üniversitesi Toz Metalurji laboratuvarında bulunan Time Technology markasının TH 500 modelindeki tezgâh tipi manuel Rockwell sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz ile Rockwell A, B, C, D, E, F, G, H, K skalalarında ölçüm yapılabilmektedir. Cihazın yükleme sistemi el ile kumandalı, hidrolik kompanzasyonlu bir sistemdir. Parçaya uygulanan yük cihazın arka bölümünde sabit bir şekilde mevcuttur ve yük değişimlerinde ağırlıkların sökülüp takılmasını gerektirmez.



Resim 4.8. Sertlik ölçüm cihazı

Ölçümler, parçanın cihaza yerleştirilmesi ve elmas ucun parçaya temas ettirilmesinden sonra 10Kgf ön yük ile manuel olarak yüklenip cihazın kenarında bulunan kol yardımı ile 60Kgf toplam yük uygulanması ile yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonrasında HRA cinsinden sertlik değerleri elde edilmiştir. Her bir parça üzerinden 10 farklı noktadan ölçümler alınmış olup elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak çizelge 4.18’de belirtilmiştir. Şekil 4.26’da gösterilen noktalardan alınan ölçüm değerlerinin tamamı EK-5’teki çizelgede mevcuttur. Çizelge 4.18 üzerinde “1. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ilk parçayı, “2. Deney” ifadesi parça numaraları sütunundaki ikinci parçayı “3. Deney” ifadesi de parça numaraları sütunundaki üçüncü parçadan alınan sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.26. Sertlik ölçüm noktaları

Çizelge 4.18. Yüzey sertlik değerleri

Deney No	Parça No	Değişkenler				Sertlik (HRA)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	51,98	51,49	51,20
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	50,38	52,63	51,32
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	54,51	55,11	54,19
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	53,09	54,30	53,89
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	50,09	50,87	50,46
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	49,93	52,22	50,31
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	48,54	47,29	47,20
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	51,16	52,72	53,60
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	47,39	46,14	47,69
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	53,25	53,65	54,08
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	52,53	51,94	52,07
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	49,61	52,92	51,35
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	46,12	45,72	45,84
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	51,31	51,46	52,68
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	51,93	50,70	52,25
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	53,08	50,88	52,68
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	49,02	50,50	48,79
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	51,27	54,56	54,08
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	54,48	53,64	54,10
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	49,84	50,13	51,55
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	51,10	51,42	50,90
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	50,69	49,28	49,73
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	47,32	48,87	47,03
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	55,37	53,84	54,64
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	50,80	52,07	51,33
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	53,37	51,99	51,81
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	48,66	50,78	48,61

Elde edilen değerleri kullanarak optimum sertlik değerinin bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE /Response Surface / Analyze Response Surface Design” Sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.19. Yüzey sertlik değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	51,17830	0,311	164,68	0,000	
Kalınlık	3,07056	0,153	20,02	0,000	1,01
Hız	-0,99584	0,155	-6,41	0,000	1,03
Lazer Gücü	0,31088	0,155	2,00	0,050	1,03
Basınc	0,16971	0,155	1,09	0,279	1,03
Kalınlık*Kalınlık	-0,12260	0,236	-0,52	0,605	1,26
Hız*Hız	-0,24500	0,230	-1,06	0,291	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	-0,06542	0,230	-0,28	0,777	1,25
Basınc*Basınc	-0,06000	0,230	-0,26	0,795	1,25
Kalınlık*Hız	0,66512	0,264	2,52	0,014	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	-0,15511	0,264	-0,59	0,559	1,03
Kalınlık*Basınc	-0,09909	0,264	-0,38	0,708	1,03
Hız*Lazer Gücü	0,37333	0,266	1,41	0,165	1,00
Hız*Basınc	-0,10417	0,266	-0,39	0,696	1,00
Lazer Gücü*Basınc	0,08000	0,266	0,30	0,764	1,00

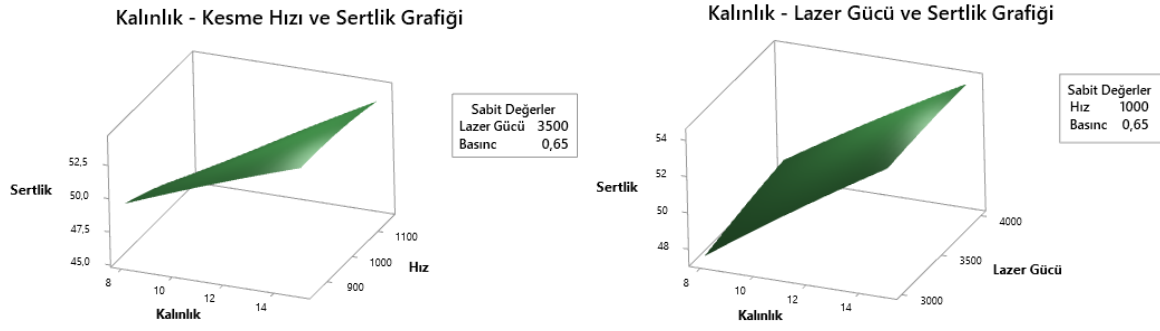
Çizelge 4.20. Yüzey sertlik değeri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,920263	87,41%	84,74%	80,78%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Rz ortalama pürüz derinliği değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

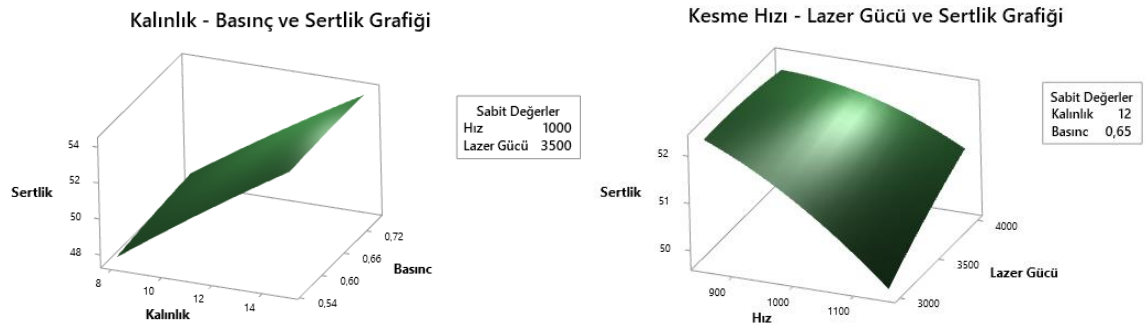
$$S = 51,17830 + 3,07056x_1 - 0,99584x_2 + 0,31088x_3 + 0,16971x_4 + 0,66512x_1x_2 \quad (\text{Eş. 4.5})$$

Eşitlikte S: Sertlik (HRA), x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



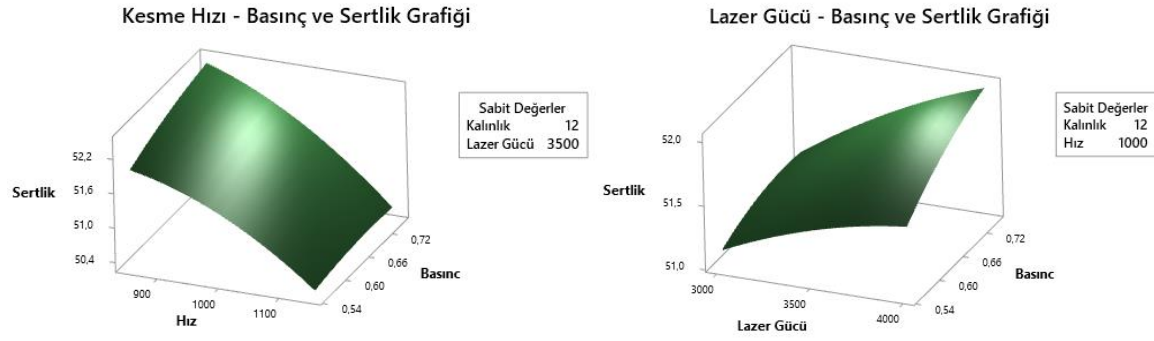
Şekil 4.27. Yüzey sertliği için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği

Grafiğe bakıldığında sertlik değerinin kalınlık arttıkça arttığı ve özellikle düşük kalınlıklarda kesme hızı arttıkça azaldığı görülmektedir. Yani sertlik değerinin kalınlık ile doğru orantılı, kesme hızı ile ters orantılı olduğu söylenebilir. Diğer grafiğe bakıldığında sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında sertlik değerinin malzeme kalınlığı arttıkça arttığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça özellikle düşük kalınlıklarda sertlik değeri azalmaktadır.



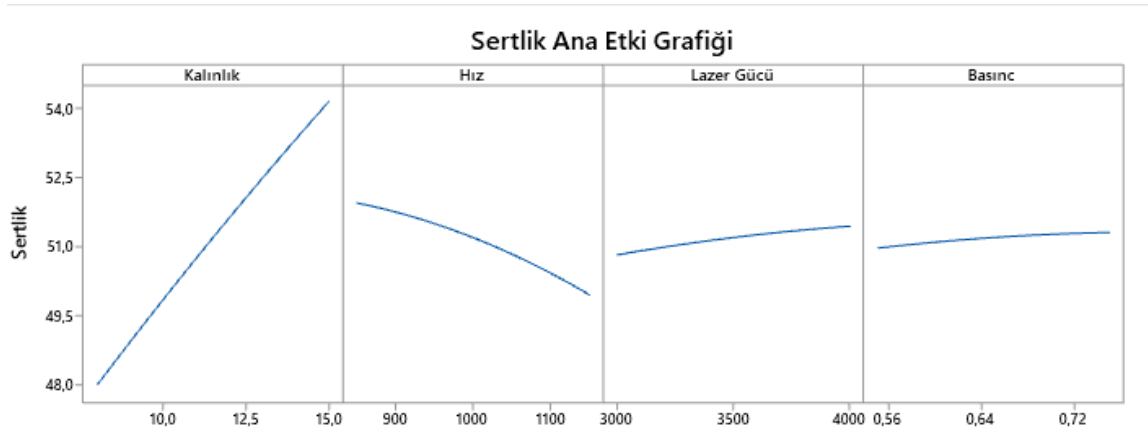
Şekil 4.28. Yüzey sertliği için kalınlık–basınc ve kesme hızı–lazer gücü grafiği

Şekil 4.28 incelendiğinde sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında yüzey sertliği değerinin kalınlık ile doğru orantılı olduğu, yardımcı gaz basıncının sertlik üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. Diğer grafik incelendiğinde ise sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında yüzey sertliği değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün artması da yüzey sertliğini arttıran bir başka faktör olarak görülmüştür.



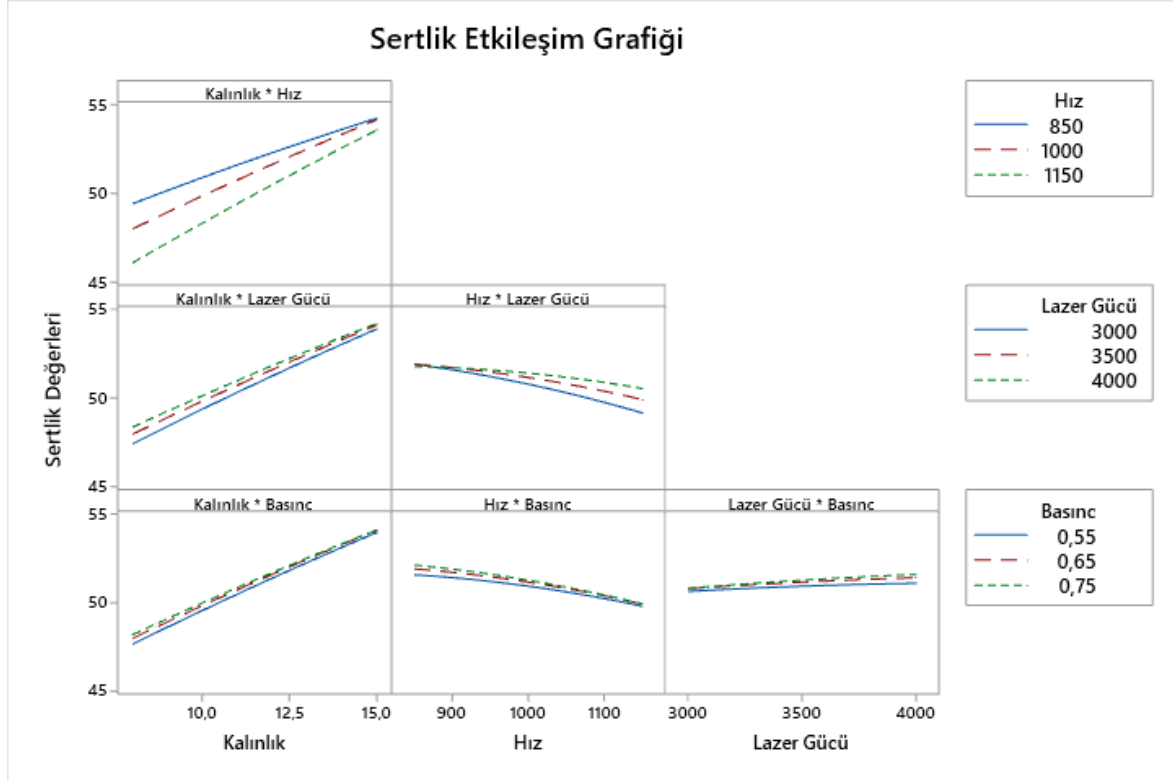
Şekil 4.29. Yüzey sertliği için kesme hızı-basınç ve lazer gücü-basınç grafiği

Şekil 4.29'da bulunan grafiklere göre sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında kesilen numunelerin yüzey sertliği değerinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Yine aynı şekilde yardımcı gaz basıncı azaldıkça yüzey sertliği değeri azalmaktadır. Lazer gücü ve basınç etkilerinin gösterildiği diğer grafiğe bakıldığında, kalınlık ve kesme hızının sabit tutulduğu durumlarda yüzey sertliği değerinin basıncın ve lazer gücünün azalması ile azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.30. Sertlik ana etki grafiği

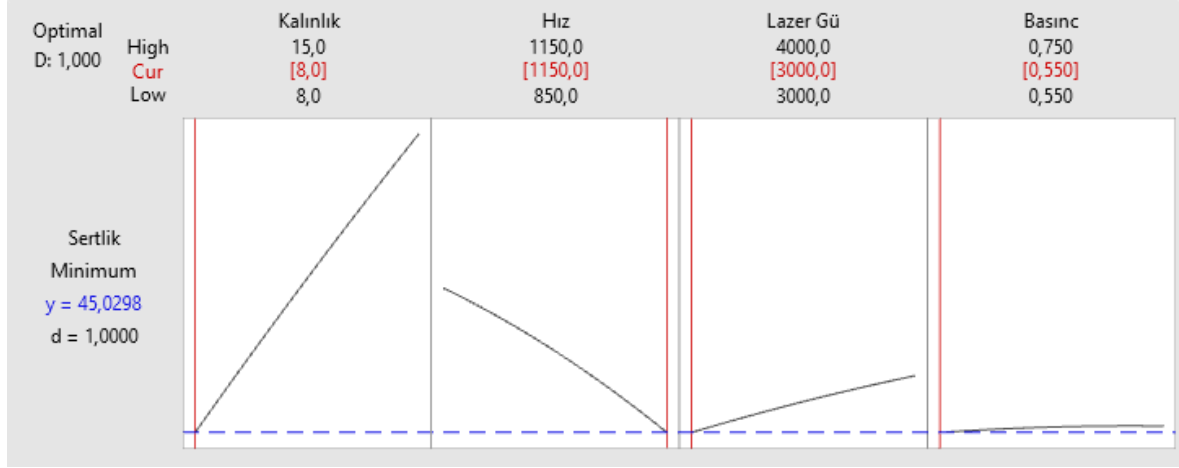
Sertlik ana etki grafiklerine bakıldığında yukarıda belirtilen diğer grafikler ile paralel olarak kalınlığın artması ile malzeme sertliğinin arttığı, kesme hızının artması ile yüzey sertliği değerinin azaldığı, lazer gücünün sertlik üzerinde diğer parametrelere göre daha az etkisinin görüldüğü ve lazer gücünün artması ile yüzey sertlik değerinin arttığı, yardımcı gaz basıncının yüzey sertliğine etkisinin az olduğu ve yüzey sertlik değerinin gaz basıncı değeri ile doğru orantılı olduğu görülmüştür.



Şekil 4.31. Sertlik etkileşim grafiği

Lazer ile kesme işlemi sonucunda yüzey sertliği değerinin yüksek düzeyde veya mümkün olan en az seviyede olması istenebilir. Bu durum kesilen malzemenin kullanım alanına göre değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada mümkün olan en düşük sertlik değerini bulmak amacıyla yapılan çalışmada Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece yüzey sertliği değerinin (Rz) en küçüklenmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük yüzey sertliği değerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Programdan elde edilen çıktılarına göre kalınlık:8 mm, kesme Hızı:1150,0 mm/dk., lazer Gücü:3000 Watt, yardımcı gaz basıncı:0,55 bar değerlerinde seçildiğinde yüzey sertliği değerinin 45,02 HRA olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.32. Yüzey sertliği optimizasyon grafiği

4.5.3. Isıdan etkilenen bölge büyüklüğü

Kesilen parçaların ısı ile etkileşiminden dolayı kesim yüzeyi kenarlarındaki ısıdan etkilenmiş bölge büyüklüğü (ITAB) Gazi Üniversitesi Toz Metalürji laboratuvarında bulunan Leica marka mikroskop altında görüntülenerek ölçülmüştür. Isıdan etkilenen bölge büyüklüğünü görüntüleyebilmek için mevcut parçaların büyüklüğünden dolayı yüzey parlatma işlemleri yapılamadığından parçaların üzerinden daha küçük miktarda numuneler kesilerek ölçüm işlemleri yapılmıştır.



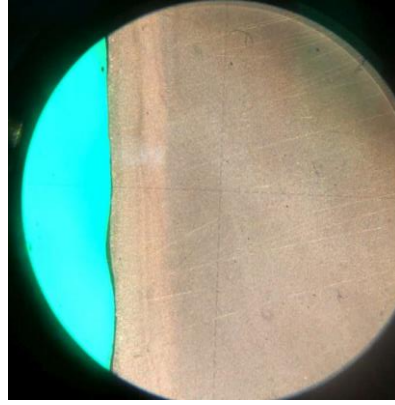
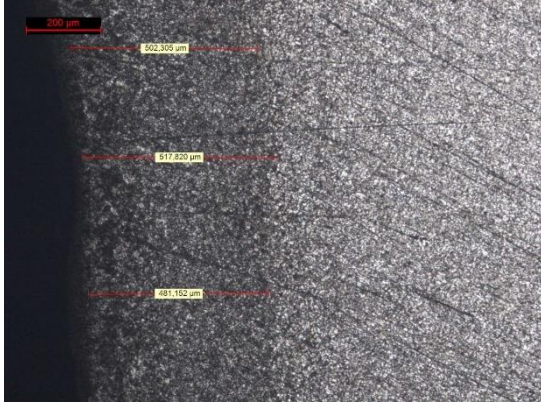
Resim 4.9. ITAB ölçümü yapılan parça örneği

Kesilen parçalar 400, 600, 1200 ve 2500 kum zımparalar ile Gazi Üniversitesi Toz Metalürji Laboratuvarındaki Struers marka Labpol1 parlatma makinasında parlatılmıştır. Dağlama işlemi için ISO/TR16060 standartlarında belirtilen şekilde %95 etil alkol (C_2H_5OH) ve %5

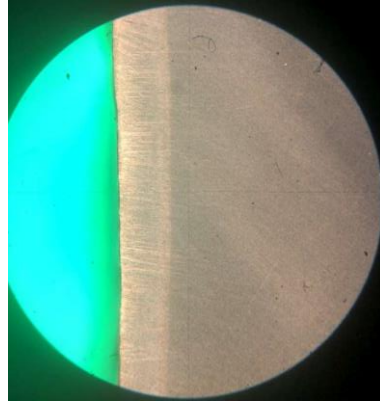
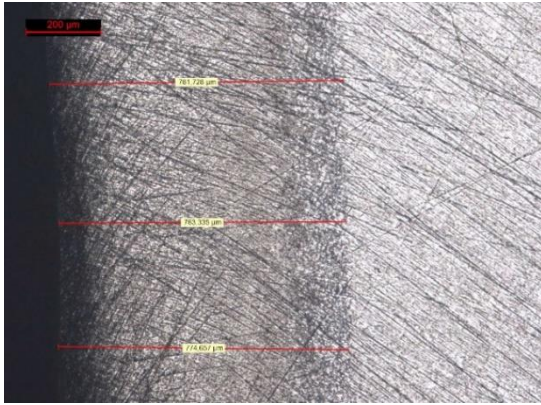
nitrik asit (HNO_3) ile hazırlanmış olan nital çözeltisinde 10-15 saniye bekletilerek mikroskop altında 50x büyütülerek incelemeleri yapılmıştır. Mikroskop görüntülerinde, parçanın en az üç noktasından ölçüm alınıp bu ölçümlerin aritmetik ortalaması aşağıdaki tabloya eklenmiştir. Her bir ölçüm değeri EK-6’da çizelgede gösterilmiştir. Çizelge 4.21’de “1. Deney” sütununda belirtilen değerler “Parça No” olarak belirtilen sütundaki ilk parçanın ölçüm değerlerini, “2. Deney” olarak belirtilen sütundaki değerler “Parça No” sütunundaki ikinci parçanın ölçüm değerlerini belirtmektedir. “3. Deney” olarak belirtilen sütundaki değerler “Parça No” sütunundaki üçüncü parçanın ölçüm değerlerini belirtmektedir.

Çizelge 4.21. ITAB mesafeleri

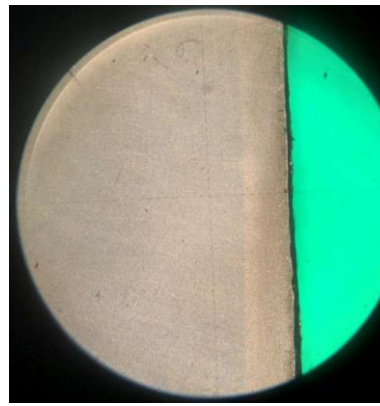
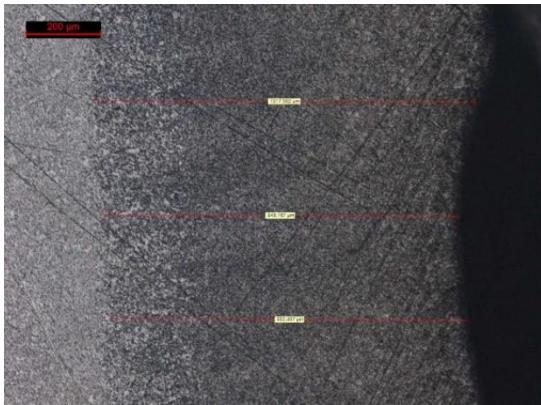
Deney No	Parça No	Değişkenler				ITAB Mesafesi (µm)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(80-25-72)	12	1000	3000	0,75	778,89	786,03	745,02
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	839,55	834,83	819,32
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	921,86	946,29	972,63
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	920,89	902,13	906,32
5	(69-30-45)	12	1150	4000	0,65	742,66	779,92	721,47
6	(56-11-48)	12	1150	3500	0,55	721,95	689,97	669,75
7	(54-44-76)	8	1000	3000	0,65	444,96	438,34	424,20
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	859,77	862,62	856,00
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	458,11	452,46	437,87
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	853,17	857,47	845,17
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	850,83	786,39	825,41
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	892,74	903,96	909,61
13	(75-65-81)	8	1150	3500	0,65	500,43	425,22	439,28
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	779,39	785,93	769,50
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	815,58	761,58	725,31
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	827,77	815,58	820,7
17	(77-55-57)	8	850	3500	0,65	581,80	531,50	649,52
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	848,95	891,73	849,46
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	916,18	904,00	902,24
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	713,02	688,08	720,09
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	773,24	735,61	730,00
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	629,31	628,91	631,64
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	474,00	467,10	483,96
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	897,84	949,18	958,09
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	825,47	778,91	769,46
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	853,63	875,30	827,33
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	542,29	493,48	497,63



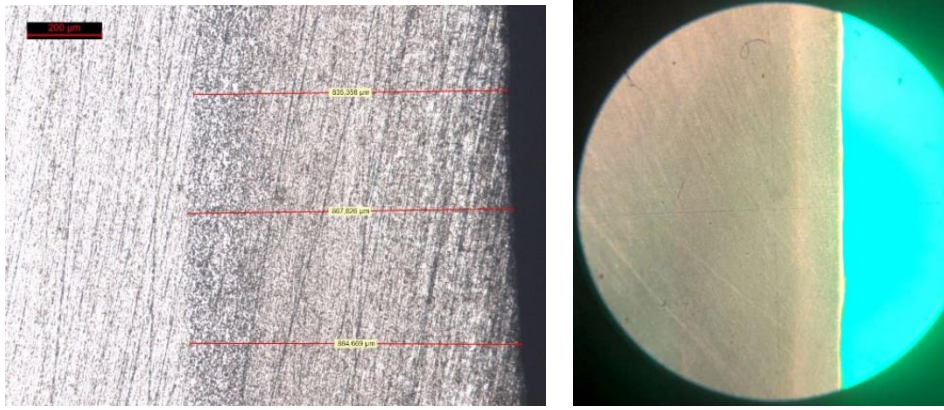
Resim 4.10. Parça 75 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü



Resim 4.11. Parça 6 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü



Resim 4.12. Parça 28 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü



Resim 4.13. Parça 10 optik mikroskop(50x) ve takımcı mikroskop(15x) görüntüsü

Elde edilen değerleri kullanarak optimum ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğünün bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.22. ITAB büyüklüğü için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	750,42637	9,93	75,55	0,000	
Kalınlık	208,37361	4,90	42,51	0,000	1,01
Hız	-73,56304	4,97	-14,81	0,000	1,03
Lazer Gücü	40,91314	4,97	8,24	0,000	1,03
Basınc	5,42846	4,97	1,09	0,278	1,03
Kalınlık*Kalınlık	-57,79970	7,54	-7,67	0,000	1,26
Hız*Hız	2,97472	7,35	0,40	0,687	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	0,92306	7,35	0,13	0,900	1,25
Basınc*Basınc	0,36806	7,35	0,05	0,960	1,25
Kalınlık*Hız	9,57814	8,43	1,14	0,260	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	2,23331	8,43	0,26	0,792	1,03
Kalınlık*Basınc	-7,01593	8,43	-0,83	0,408	1,03
Hız*Lazer Gücü	9,32750	8,49	1,10	0,276	1,00
Hız*Basınc	1,44917	8,49	0,17	0,865	1,00
Lazer Gücü*Basınc	-8,51333	8,49	-1,00	0,320	1,00

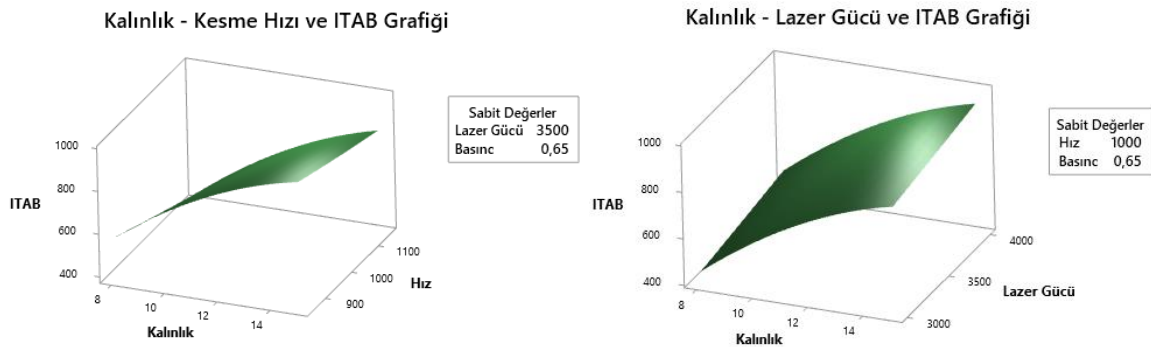
Çizelge 4.23. ITAB değerleri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
29,4111	97,18%	96,59%	95,71%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle Rz ortalama pürüz derinliği değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

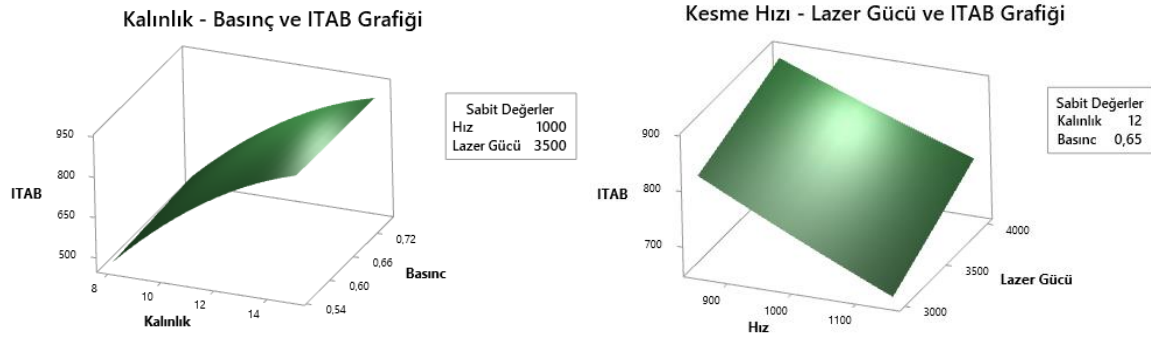
$$I=750,42637+208,37361x_1-73,56304x_2+40,91314x_3+5,42846x_4-57,79970x_1^2 \quad (\text{Eş. 4.5})$$

Denklemden I: Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü, x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınç olarak belirtilmiştir. Minitab19 programı kullanılarak elde edilen veriler ışığında, değişen parametrelerin etkilerinin daha kolay anlaşılması ve değerlendirilmesi için oluşturulan grafikler ve yorumlar şu şekildedir;



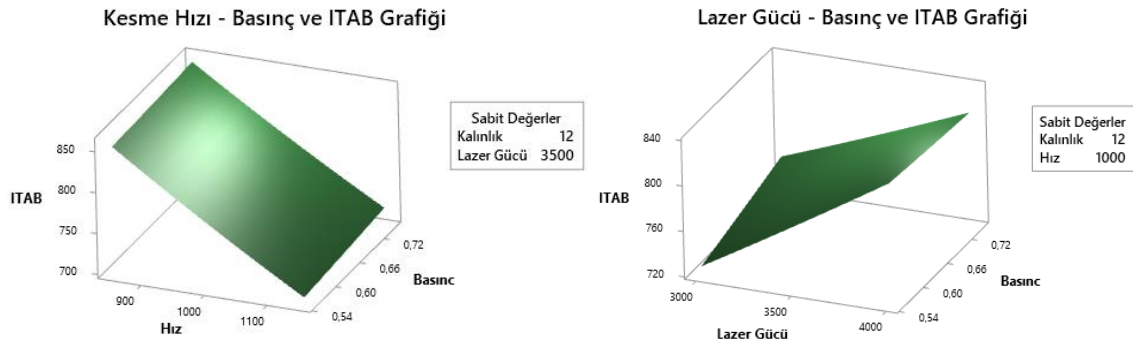
Şekil 4.33. ITAB mesafesi için kalınlık–kesme hızı ve kalınlık–lazer gücü grafiği

Grafiğe bakıldığında Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü değerinin kalınlık ve kesme hızı arttıkça arttığı görülmüştür. Yani ITAB büyüklüğü değerinin kalınlık ve kesme hızı ile doğru orantılı olduğu söylenebilir. Kalınlık ve lazer gücünün gösterildiği diğer grafiğe bakıldığında sabit kesme hızı ve sabit yardımcı gaz basıncı değerleri altında ITAB büyüklüğünün malzeme kalınlığı arttıkça arttığı görülmüştür. Lazer gücü azaldıkça ITAB değeri azalmaktadır.



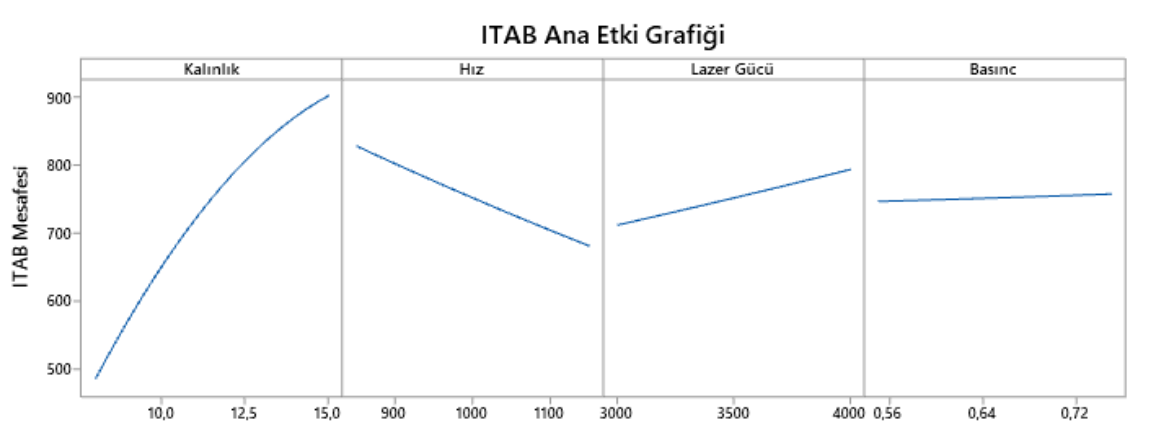
Şekil 4.34. ITAB mesafesi için kalınlık–basınç ve kesme hızı–lazer gücü grafiği

Şekil 4.34 incelendiğinde birinci grafikte sabit kesme hızı ve sabit lazer gücü altında ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğü değerinin kalınlık ile doğru orantılı olduğu görülmüş yardımcı gaz basıncının ITAB üzerinde etkisi olmadığı görülmüştür. Kesme hızı ve lazer gücünün gösterildiği diğer grafik incelendiğinde ise sabit kalınlık ve sabit yardımcı gaz basıncı altında ITAB mesafesinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Lazer gücünün artması da ITAB mesafesini arttıran bir başka faktör olarak tespit edilmiştir.



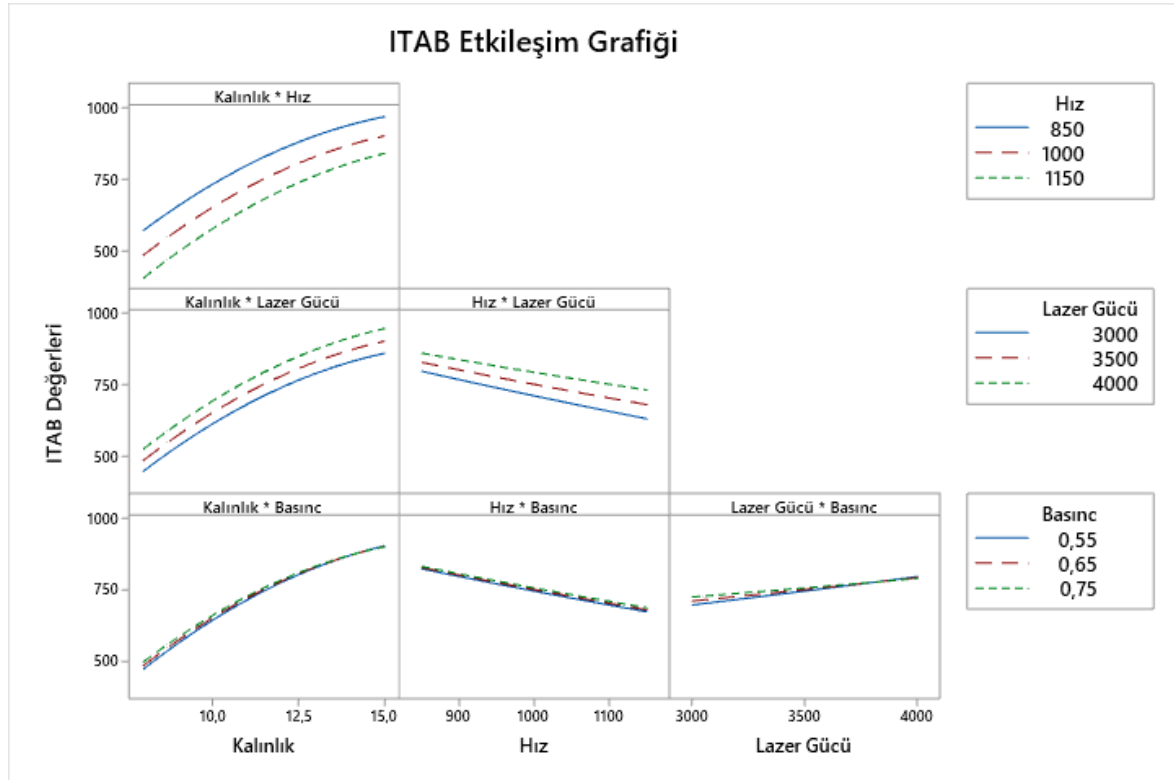
Şekil 4.35. ITAB mesafesi için kesme hızı–basınç ve lazer gücü–basınç grafiği

Şekil 4.35'e göre sabit kalınlık ve sabit lazer gücü altında kesilen numunelerin ITAB mesafesinin kesme hızının artması ile azaldığı görülmektedir. Yardımcı gaz basıncı değerlerinin ITAB mesafesi üzerinde çok fazla bir etkisi olmasa da basıncın azalması ile azaldığı söylenebilir. Lazer gücü ve basınç etkilerinin gösterildiği diğer grafiğe bakıldığında, kalınlık ve kesme hızının sabit tutulduğu durumlarda yüzey sertliği değerinin lazer gücünün azalması ile azaldığı görülmüştür. Özellikle düşük kalınlıklarda yardımcı gaz basıncı değerinin artması ITAB mesafesini arttırmıştır.



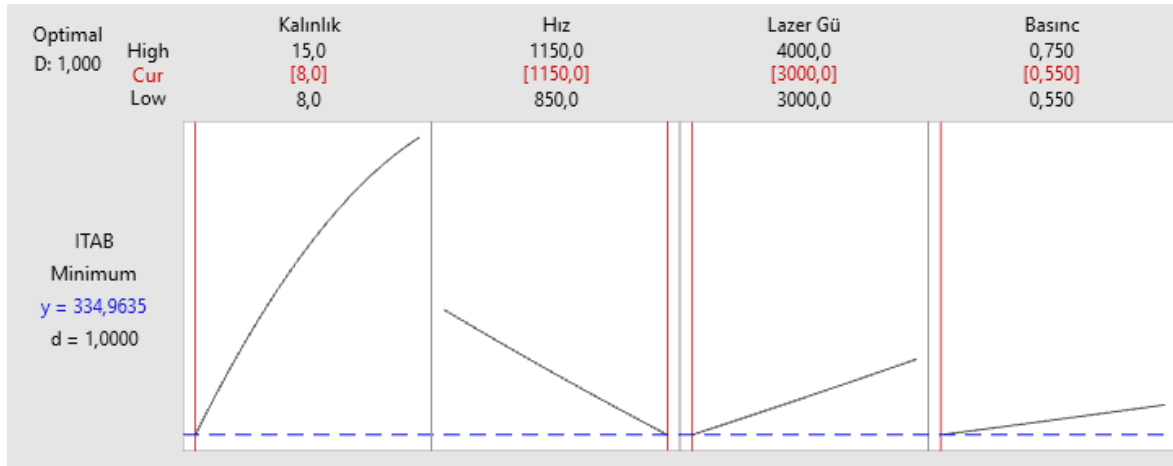
Şekil 4.36. ITAB ana etki grafiği

Yukarıda belirtilen grafiklerin bir anlamda özeti olan ITAB ana etki grafiklerine bakıldığında, kalınlığın artması ile ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğünün arttığı, kesme hızının artması ile ITAB mesafesinin azaldığı, lazer gücünün artması ile ısıdan etkilenen bölge büyüklüğünün arttığı, yardımcı gaz basıncının etkisinin az olduğu ve ITAB büyüklüğünün gaz basıncı değeri ile doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.37. ITAB etkileşim grafiği

Lazer ile kesme işlemi sonucunda ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğünün yüksek düzeyde veya mümkün olan en az miktarda olması istenebilir. Bu durum kesilen malzemenin kullanım alanına göre değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmada ısıdan etkilenmiş bölge büyüklüğünün mümkün olan en düşük değerini bulmak amacıyla yapılan çalışmada Minitab19 programından yararlanılarak optimizasyon yapılmıştır. Sadece ısı tesiri altındaki bölge büyüklüğünün en küçüklenmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak en düşük ITAB mesafesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Programdan elde edilen çıktılarına göre kalınlık:8 mm, kesme Hızı:1150,0 mm/dk., lazer Gücü:3000 Watt, yardımcı gaz basıncı:0,55 bar değerlerinde seçildiğinde ITAB mesafesinin 334,96 μm olarak bulunabileceği görülmüştür.



Şekil 4.38. ITAB optimizasyon grafiği

4.5.4. İşlem süresi

İşlem süresi, her bir parçanın ne kadar sürede üretildiğini görerek optimizasyon çalışması ile zaman kayıplarını engellemesi amacıyla değerlendirilmiştir. İşlem süresini direk olarak etkileyen faktör kesme hızıdır. Büyük ölçekli imalatlarda işlem süresinin azalması ürün maliyetinin azalmasını sağlayacaktır.

Çizelge 4.24. Kesme işlemi süreleri

Deney No	Parça No	Değişkenler				İşlem Süresi (Sn.)		
		Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/dk.)	Lazer Gücü (W)	Gaz Basıncı (Bar)	1. Deney	2.Deney	3.Deney
1	(25-72-80)	12	1000	3000	0,75	35,33	35,33	35,33
2	(31-34-39)	12	1000	4000	0,55	35,33	35,33	35,33
3	(1-2-28)	15	1000	4000	0,65	37,33	37,33	37,33
4	(21-46-68)	15	1000	3500	0,55	37,33	37,33	37,33
5	(30-45-69)	12	1150	4000	0,65	32,67	32,67	32,67
6	(11-48-56)	12	1150	3500	0,55	32,67	32,67	32,67
7	(44-54-76)	8	1000	3000	0,65	35,33	35,33	35,33
8	(7-10-73)	12	850	3500	0,75	39,00	39,00	39,00
9	(4-50-66)	8	1000	3500	0,55	35,33	35,33	35,33
10	(37-38-60)	15	1150	3500	0,65	32,67	32,67	32,67
11	(17-43-79)	12	1000	4000	0,75	35,33	35,33	35,33
12	(15-33-53)	12	850	4000	0,65	39,00	39,00	39,00
13	(65-75-81)	8	1150	3500	0,65	32,67	32,67	32,67
14	(20-36-49)	12	1000	3500	0,65	35,33	35,33	35,33
15	(52-62-78)	12	1000	3500	0,65	35,33	35,33	35,33
16	(24-26-41)	12	850	3000	0,65	39,00	39,00	39,00
17	(55-57-77)	8	850	3500	0,65	39,00	39,00	39,00
18	(18-19-32)	15	1000	3000	0,65	35,33	35,33	35,33
19	(3-35-70)	15	1000	3500	0,75	37,33	37,33	37,33
20	(8-16-42)	12	1150	3500	0,75	32,67	32,67	32,67
21	(6-13-47)	12	1000	3000	0,55	47,00	47,00	47,00
22	(9-14-51)	12	1150	3000	0,65	32,67	32,67	32,67
23	(23-71-74)	8	1000	3500	0,75	35,33	35,33	35,33
24	(12-22-40)	15	850	3500	0,65	39,00	39,00	39,00
25	(58-59-67)	12	1000	3500	0,65	35,33	35,33	35,33
26	(5-61-63)	12	850	3500	0,55	39,00	39,00	39,00
27	(27-29-64)	8	1000	4000	0,65	35,67	35,67	35,67

Elde edilen değerleri kullanarak optimum kesme süresinin bulunması için katsayı denklemi oluşturulmuştur. Bunun için Minitab19 paket programında “Stat / DOE / Response Surface / Analyze Response Surface Design” Sekmesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.25. Süre değeri için öngörülen etkili faktörler ve katsayıları

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	35,26360	0,555	63,52	0,000	
Kalınlık	0,47222	0,274	1,72	0,089	1,01
Hız	-3,16667	0,278	-11,41	0,000	1,03
Lazer Gücü	-0,79866	0,278	-2,88	0,005	1,03
Basınc	-0,95917	0,278	-3,45	0,001	1,03
Kalınlık*Kalınlık	0,11140	0,421	0,26	0,792	1,26
Hız*Hız	-0,25000	0,411	-0,61	0,545	1,25
Lazer Gücü*Lazer Gücü	1,00000	0,411	2,43	0,018	1,25
Basınc*Basınc	1,20833	0,411	2,94	0,005	1,25
Kalınlık*Hız	0,00000	0,471	0,00	1,000	1,03
Kalınlık*Lazer Gücü	0,21924	0,471	0,47	0,643	1,03
Kalınlık*Basınc	-0,13702	0,471	-0,29	0,772	1,03
Hız*Lazer Gücü	-0,00000	0,475	-0,00	1,000	1,00
Hız*Basınc	0,00000	0,475	0,00	1,000	1,00
Lazer Gücü*Basınc	2,91667	0,475	6,15	0,000	1,00

Çizelge 4.26. Süre değerleri için model özeti

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1,64388	76,24%	71,20%	63,35%

Minitab19 program çıktısına göre model özeti tablosuna bakıldığında R-Sq değerlerinin yeterli seviyede olduğu görülmektedir. Bu nedenle işlem süresi değeri için aşağıda sunulan regresyon eşitliklerinin geçerliliklerinin yeterli olduğu söylenebilir.

$$T = 35,26360 + 0,47222x_1 - 3,16667x_2 - 0,79866x_3 - 0,95917x_4 + 1,00000x_3^2 + 1,20833x_4^2 + 2,91667x_3x_4 \quad (\text{Eş. 4.6})$$

Denklemde T: Süre, x_1 : Kalınlık, x_2 : Kesme hızı, x_3 : Lazer Gücü, x_4 : Basınc olarak belirtilmiştir. Kesme süresine etki eden ana parametre kesme hızı olduğu için diğer grafikler buraya eklenmemiştir. Kesme hızının artması ile parça başı işlem süresi kısalmaktadır ancak kesme hızı arttırılmadan önce, diğer etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Aşağıda süre ana etki grafiğinde de görüldüğü gibi kesme hızı faktörü haricindeki diğer faktörlerin etkisi 1 saniye mertebelerinde olduğu için dikkate alınmamıştır.



Şekil 4.39. Süre ana etki grafiği

4.5.5. Çapak oluşumu

Kesim sırasında ergiyen malzemenin mümkün olduğunca kısa sürede kesme bölgesinden uzaklaştırılması gerekir. Eğer kesilecek malzeme yeterince ergitilemez ya da ergitilen malzeme gerektiği gibi kesim bölgesinden uzaklaştırılmazsa, ısı ile temas halinde olan malzeme yüzeyde yapışarak soğur ve kesme bölgesinde çapak oluşumu (cüruf oluşumu) gözlenir. Deney numuneleri incelendiğinde 18-19-32 numaralı ve 37-38-60 numaralı parçalarda yüksek miktarda çapak oluşumu tespit edilmiştir. Bu parçaların ilgili tezgâh değerlerine çizelge 4.2'den baktığımızda tüm parçaların 15 mm kalınlığında olduğunu, kesme hızının yüksek, lazer gücünün düşük ve yardımcı gaz basıncının orta seviyede olduğu görülmektedir. Yardımcı gaz basıncının, çapak oluşumu gözlenen tüm deney numunelerinde de 0,65 bar değerinde olması, gaz basıncının, çapak oluşumunda diğer faktörlere göre daha az etkiye sahip olduğu anlamına gelmektedir. Ancak, çapak oluşumunu engellemek için eriyen malzemenin kesim bölgesinden uzaklaştırılması gerektiğinden hareketle, ergiyen malzemeyi mümkün olan en kısa sürede kesim bölgesinden uzaklaştırma işlemi için yardımcı gaz basıncı değerinin yüksek olması gerektiği sonucu çıkartılabilir.



Resim 4.14. 18-19-32 numaralı numunelerde çapak oluşumu



Resim 4.15. 37-38-60 numaralı numunelerde çapak oluşumu

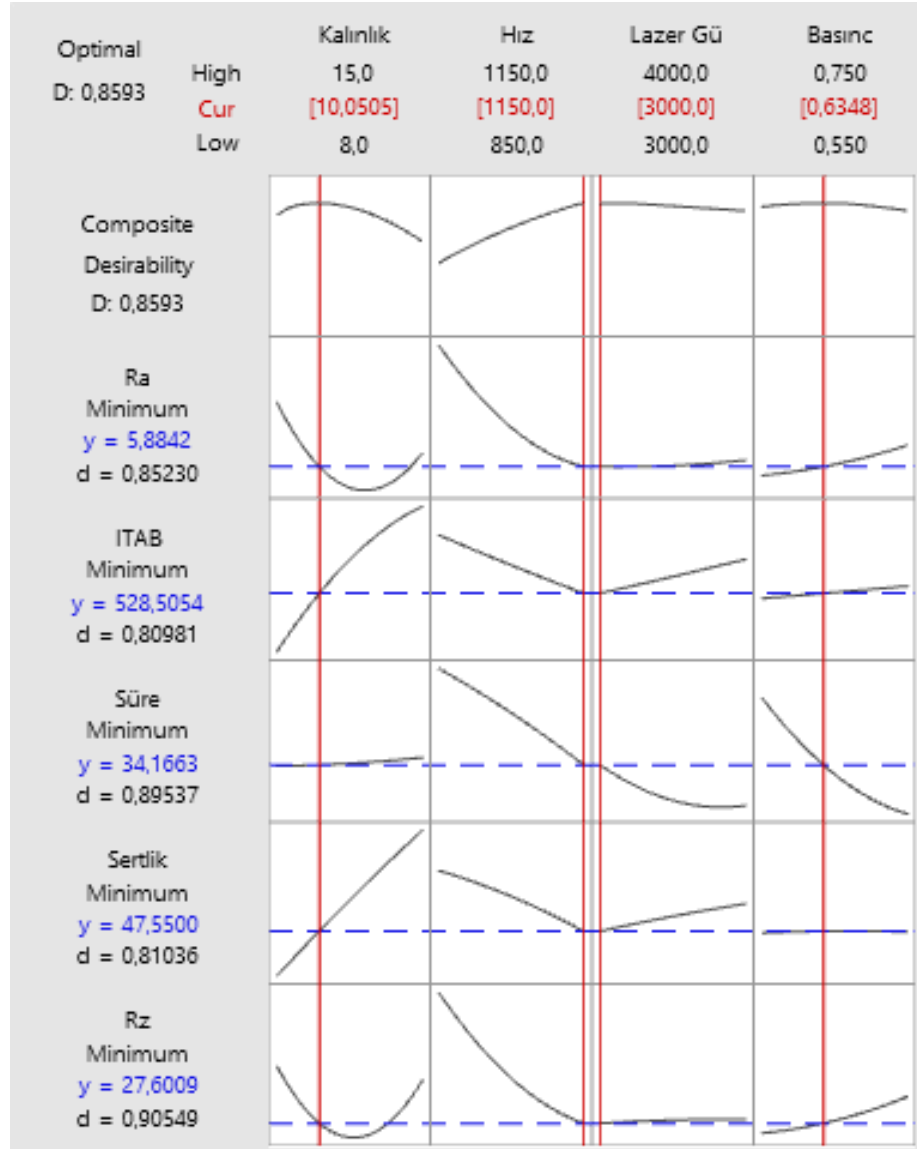
4.6. En İyileme

Fiber lazer tezgahında farklı parametreler ile kesimi yapılan 81 adet St-52 malzemenin ölçüm değerleri sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde mevcut 3 kalınlık aralığında en iyi sonuçları verecek kesme parametrelerinin bulunması için Minitab19 programı ile analiz yapılmıştır. En iyi sonuçlar olarak her bir değer minimum olduğu değer göz önüne alınmıştır. Tüm değerlerin en küçüklenmesi için “Stat / DOE / Response Surface / Response Optimizer” sekmeleri kullanılarak optimizasyon çalışması yapılmıştır.

Çizelge 4.27. Minitab amaç tablosu

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Minimum		4,188	15,672	1	1
ITAB	Minimum		424,200	972,630	1	1
Süre	Minimum		32,667	47,000	1	1
Sertlik	Minimum		45,720	55,370	1	1
Rz	Minimum		22,744	74,128	1	1
Rt	Minimum		30,976	104,490	1	1
Rq	Minimum		5,183	19,348	1	1

Çizelge 4.27’de belirtilen amaçlar sonucunda yapılan optimizasyona göre malzeme kalınlığı: 10,05 mm, kesme hızı: 1150 mm/dk., lazer gücü: 3000 Watt, yardımcı gaz basıncı: 0,63 bar değerlerinde seçildiğinde her bir değer mümkün olduğunca en küçüklenerek en iyilenmiş olacaktır. Her bir hedef değer eşit ağırlıkta değerlendirilerek en iyileme yapılmıştır.



Şekil 4.40. Optimizasyon grafiği

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar sonucunda lazer ile kesilecek malzemelerin kesim kalitesi için, tezgâh parametrelerinin ve malzeme kalınlığının her birinin önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. 8 mm, 12 mm ve 15 mm kalınlığında ST-52 malzeme özelinde değerlendirildiğinde, değişken parametreler arasından yüzey pürüzlülüğüne en çok etki eden tezgâh parametresinin kesme hızı olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinde azalma görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğüne etki eden diğer parametreler olan gaz basıncının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri artmış, lazer gücündeki değişimin seçilen parametreler için sonuçlara daha az etki ettiği görülerek lazer gücünün azalması ile yüzey pürüzlülüğünde azalma görüldüğü belirlenmiştir.

Sonuçlar yüzey sertliği açısından değerlendirildiğinde ise, kesme hızının artması ile yüzey sertliğinin azalabileceği, lazer gücü ve yardımcı gaz basıncının artışı ile makro düzeyde yüzey sertliğinin arttığı görülmüştür.

Isı tesiri altındaki bölgeye bakıldığında, kesme hızının artışının ITAB üzerinde azaltıcı etkiye sebep olduğu görülmüştür. Kesme hızı arttığı için iş parçasına aktarılan enerjinin kesme bölgesindeki etki süresi azaldığından dolayı ITAB mesafesi azalmıştır. Lazer gücünün artması ile malzeme yüzeyine etki eden enerji miktarı arttığı için ITAB mesafesinin arttığı, yardımcı gaz basıncının ise diğer faktörlere oranla daha az etki gösterdiği ancak yardımcı gaz basıncının artışı ile ITAB mesafesinin arttığı görülmüştür.

Çapak oluşumunun engellenmesi için ise kalınlık arttıkça kesme hızının azaltılması ve lazer gücünün arttırılması gerektiği tespit edilmiştir. Buna ek olarak eritilen malzemenin kesme bölgesinden daha çabuk uzaklaştırılması için yardımcı gaz basıncının artması gerektiği tespit edilmiştir.

Uygun olmayan tezgâh parametreleri ile yapılan kesimler, malzemenin istenen kalite sonuçlarını vermemesine, kesim sonucunda istenen kalitenin elde edilebilmesi için ek işlem gereksinimine ve dolayısıyla ek maliyetlerin ve zaman kayıplarının oluşmasına, hatta malzemenin hurdaya ayrılmasına sebep olabilir.

Lazer ile kesim işlemi endüstride çok çeşitli malzemeler için kullanılmaktadır. Bir malzeme için uygun olan kesme parametreleri diğer bir malzeme için çok farklı sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Bu nedenle malzemeye bağlı çalışmalar açık noktalar göz önünde bulundurularak çeşitlendirilmelidir. Ek olarak, alaşımlı metaller ve metal olmayan kompozit plakalar, çeşitli polimerler ve ağaç temelli malzemeler konusunda araştırmalar yapılmalı, teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstride kullanılmaya başlanan 3 boyutlu lazer kesme makinalarının kesim kaliteleri üzerinde çalışmalar yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Karaaslan, A. (2009). *Lazer ile Malzeme İşleme İşlemleri* (Birinci Baskı). İstanbul: Literatür Yayıncılık, 19-24, 39-43, 62-65, 173-177.
2. Hecht J. (2019). *Understanding Lasers* (Fourth Edition). United States of America: John Wiley&Sons, 4-5, 240-241.
3. Yılbaş, B. S. (1998). Study of Parameters for CO₂ Laser Cutting Process. *Material And Manufacturing Process*, 13(4), 517-536.
4. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., and Cheraghi, S. H. (2003, March). CO₂ Laser Cut Quality of 4130 Steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 351-358.
5. Arcan A. (2011). *Lazer Işını ile Metallerin Kesilmesine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 8-15.
6. Öner U. (2008). *Lazerle Kesme İşleminde Kesme Parametrelerinin Kesme Aralığı ve Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 24-25, 38-43, 92-93.
7. Trumpf. (2007). *Laser Processing CO₂ Laser*. Germany: Trumpf Werkzeugmaschinen, 28-37.
8. Ghany, K. A., Newishy, M. (2005, October). Cutting of 1,2mm Thich Austenitic Stainless Steel Using Pulsed and CW Nd:YAG Laser. *Journal of Materials Processing Technology*, 438-447.
9. Wandera, C., Kujañpää, V. (2011, May). Optimization of Parameters for Fibre Laser Cutting of 10mm Stainless Steel Plate. *Journal of Engineering Manufacture*, 641-649.
10. Ezpelata D.T. (2013). *Contribution to Laser Milling Process Parameters Selection for Process Planning Operations*, Doctoral Thesis, University of Girona, Girona, 11-30.
11. Pınarcıoğlu S. (2010). *304 Östenitik Paslanmaz Çelik ile St37 Malzemenin Gaz Ergitme ve Lazer Yöntemleriyle Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Etkileri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 32-35.
12. Andersson N., Granberg C. (2015). *Laser Cutting in Ti-6Al-4V Sheet: Doe and Evaluation of Process Parameters Informative*, Master Degree Thesis, Chalmers University of Technology Department of Materials and Manufacturing Technology, Gothenburg, 15-19.
13. Mungan M.C. (2006). *Lazer ile Kesme ve Endüstriyel Uygulamaları*, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antakya, 2-9, 37-44.
14. Anık S., Özgür A., Vural M. (1996). *Termik Kesme Teknolojisi* (Birinci Baskı). İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, 109-117.

15. O'Shea, D.C., Callen, W.R., Rhodes, W.T. (1978). *Introduction to Lasers and Their Applications* (Second Edition). United States of America: Addison-Wesley, 2-3.
16. Bayraktar Ş. (2015). *Farklı Kesme Yöntemleri ile Üretilen Silisli Sac Paketlerinin Elektrik Makinalarının Performansı Üzerine Etkisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-51.
17. Kurt M. (2006). *Plastik Malzemelerin (PFTE ve POM) Lazer ile Kesilme Özelliklerinin DeneySEL İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 21-24.
18. Patel, J. M., and Patel, D. M. (2011, July). Parametric Investigation in CO₂ Laser Cutting Quality of Hardox-400 Materials. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 5979-5984.
19. Öncel L. (2009). *316L Çelik Esaslı İmplantların Çeşitli Kesilme Yöntemleri ile Kesilmesinin ve Kesim Sonrası Tavlama İşlemlerinin Mikroyapısal Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 29-32.
20. Prajapati, B. D., Patel, R. J., and Khatri, B. C. (2013, April). Parametric Investigation of CO₂ Laser Cutting of Mild Steel and Hardox-400 Material. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 204-208.
21. Erdoğan Ş. (2007). *Lazerle Delmede İşleme Parametrelerinin Delik Kalitesine Olan Etkisinin DeneySEL Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-51.
22. Madic, M. J., and Radovanovic, M. R. (2012, January). Analysis of the Heat Affected Zone in CO₂ Laser Cutting of Stainless Steel. *Thermal Science*, 363-373.
23. Cekic, A., Begic, D., Kulenovic, M. (2012). *Optimization of Process Parameters of Alloy Steels Using CO₂ Lasers*. International DAAAM Symposium, 0247-0250.
24. Tunç M. (2015). *CO₂ Lazer Kesim Tezgahlarında Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 15-17.
25. Cekic, A., Begic-Hajdarevic, B., Kulenovic, M., and Omerspahic, A. (2014). CO₂ Laser Cutting of Alloy Steels Using N₂ Assist Gas. *Procedia Engineering*, 310-315.
26. Zaied, M., Bayraktar, E., Katundi, D., Boujelbene, M., and Miraoui, I. (2012, September). Effect of Laser Cutting Parameters on Surface Quality of Low Carbon Steel (S235). *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 128-134.
27. Tufanoğlu E. (2017). *P460-St52 Malzeme Çiftinin Tozaltı Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 14-15.
28. Bernat,R., Zalezak,Z., Zarnovsky, J., Kescskes, N., (2018). Monitoring The Quality of Laser Cutting. *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, 137-145.

29. Pham, D.T., Dimov, S.S., Ji, C., Petkov, P.V., Dovrev, P. (2004). Laser Milling as a “Rapid” Micromanufacturing Process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part. B: Journal Engineering Manufacture*, 2018(1), 1-7.
30. Patel D.M. (2015). *Investigations on the Performance Characteristics of Fiber Laser Cutting During Sheet Metal Cutting Operations*, Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering&Technology, Khreva, Mehsana, India, 5-34.
31. Tunna, L., Kearns, A., O’Neill, W., Surcliffe, C.J. (2001, May). Micromachining of Copper Using Nd:YAG Laser Radiation at 1064, 532 and 355 nm Wavelengths. *Optics & Laser Technology*, 33(3), 135-143.
32. Poprawe, R., König, W. (2001). Modelling, Monitoring and Controlling High Quality Laser Cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 50(1), 137-140.
33. Belic, I., Stanic, J. (1987). A Method to Determine the Parameters of Laser Iron and Steel Cutting. *Optics & Laser Technology*, 19(6), 309-311.
34. Hashemzadeh M. (2014). *Investigations Into Fibre Laser Cutting*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical, Materials and Manufacturing Engineering, University of Nottingham, Nottingham, 12-20.
35. Montgomery, D.C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. (sixth edition). Newyork: John Wiley & Sons Inc., 3-9.
36. Akman, G., Özkan C. (2011). Sac İmalatında Karşılaşılan Yapışma Problemlerinin Deney Tasarımı ile Çözümü. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 12(2), 187-199.
37. Baş C. (2010). *Cevap Yüzeyi Tasarımları ve Sinir Ağları Yaklaşımı*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-12.
38. Basri, M., Rahman, R.N.Z.R.A., Ebrahimpour, A., Salleh, A.B., Ryantin, E. (2007). Comparison of estimation capabilities of response surface methodology (RSM) with artificial neural network (ANN) in lipase-catalyzed synthesis of palm-based wax ester. *BMC Biotechnol*, 53(7), 1-14.
39. Myers, R.H. Khuri, A.I., Vining, G. (1992, May). Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach, *The American Statistician*, 46(2), 131-139.
40. Baynal K. (2003). *Çok Yanıtlı Problemlerin Taguchi Yöntemi ile Eniyilenmesi ve Bir Uygulama*, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 100-104.
41. Al-qaisy S.J.S. (2019). *CO₂ Gaz Lazeri Kullanılarak Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) Boruların Kesilebilirliğinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu 25-28.
42. Uzungörür M. (2015). *Iconel 718 Sac Malzemelerin Lazer ile Kesilmesinde İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 10-13.

43. Radberg M. (2016). *Design of Experiment for Laser Cutting in Superalloy Haynes 282*, Master Degree Thesis, Karlstad University Faculty of Health Science and Technology, Karlstad,
44. Bozkurt A. (2018). *ESD ile Sert Faz Kaplanmış Titanyum Alaşımlarının ve Çeliklerin Lazer ile İşlenmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 27-31.

EKLER

EK-1. Ra ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Ra Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
1	5,816	6,919	6,528	4,481	5,07	4,927	4,045	4,102	5,843	6,805	5,454
2	4,914	5,281	5,972	5,055	4,592	5,903	3,982	4,425	7,234	7,496	5,485
3	6,99	4,507	5,323	4,178	4,027	4,162	4,69	4,921	5,498	6,905	5,120
4	5,764	5,464	5,825	9,548	14,355	11,227	10,092	10,228	15,62	15,449	10,357
5	12,297	12,778	8,747	3,914	4,452	4,368	5,887	4,401	7,488	10,879	7,521
6	5,406	4,28	4,068	4,035	2,04	3,176	3,689	4,757	4,921	7,433	4,381
7	10,886	12,279	9,139	8,783	6,325	9,129	8,906	8,518	15,995	13,481	10,344
8	5,981	6,715	4,739	5,444	3,822	4,484	5,805	4,061	6,942	7,558	5,555
9	4,653	6,169	4,209	4,458	5,239	4,729	5,908	4,316	5,568	4,631	4,988
10	6,898	7,045	6,473	4,086	7,246	8,032	7,465	8,632	13,845	11,662	8,138
11	5,894	5,146	6,109	4,305	3,773	5,021	4,021	3,525	5,312	5,824	4,893
12	9,824	10,029	6,181	6,839	3,973	5,448	5,288	4,892	8,418	5,238	6,613
13	6,021	5,177	5,241	3,041	4,178	3,921	4,255	4,477	9,079	7,331	5,272
14	4,951	4,949	3,757	3,457	5,817	4,729	3,96	3,173	5,421	10,41	5,062
15	9,384	9,056	10,338	7,92	6,379	5,208	6,743	9,625	11,929	8,962	8,554
16	5,206	4,929	6,389	5,632	4,197	3,354	3,153	4,828	6,181	5,388	4,926
17	9,116	6,229	8,33	4,361	3,358	3,399	6,108	6,217	8,971	7,531	6,362
18	6,185	4,121	4,522	5,71	5,48	5,096	4,211	4,406	6,054	6,022	5,181
19	6,48	8,322	6,404	5,724	4,383	4,183	4,227	4,861	5,517	6,182	5,628
20	3,996	5,397	4,467	4,566	5,656	4,69	4,797	4,01	5,922	5,932	4,943
21	6,418	5,778	5,101	4,622	4,7	4,735	3,995	4,006	7,601	6,335	5,329
22	9,913	7,551	8,102	5,349	4,52	5,072	5,73	4,878	7,286	6,786	6,519
23	18,521	13,878	12,168	13,697	10,818	13,521	14,292	14,438	11,945	17,269	14,055
24	6,006	9,163	11,141	8,615	5,35	5,111	8,188	6,853	10,377	14,313	8,512
25	6,655	4,39	8,358	5,178	4,312	4,127	5,568	9,112	5,165	11,415	6,428
26	6,12	11,792	10,304	8,578	6,678	4,723	5,358	6,668	15,025	10,506	8,575
27	6,953	6,935	7,57	12,691	15,436	5,849	15,047	28,698	12,603	10,659	12,244
28	5,583	4,804	5,611	5,115	4,037	4,387	3,124	4,63	7,031	5,6	4,992
29	14,422	4,32	7,612	13,653	8,186	14,971	7,477	9,393	14,388	15,173	10,960
30	4,913	3,754	3,764	4,344	4,686	4,337	3,615	3,173	4,373	4,92	4,188
31	4,359	4,186	5,809	3,811	3,696	4,544	6,217	3,451	7,819	6,916	5,081
32	4,971	5,316	6,507	6,054	6,41	8,153	5,388	5,134	5,45	6,654	6,004
33	6,189	3,744	3,963	14,886	9,881	11,008	4,972	5,11	12,026	9,41	8,119
34	2,77	4,198	3,915	4,267	4,882	5,682	4,476	3,618	7,558	6,748	4,811
35	5,796	5,364	5,307	5,285	6,671	13,096	5,226	5,23	9,36	6,775	6,811
36	6,82	4,462	5,744	3,877	3,671	3,829	3,566	4,16	7,483	4,326	4,794
37	5,533	5,076	4,569	5,828	10,823	12,114	5,294	4,409	6,344	6,569	6,656
38	5,546	11,226	5,718	5,661	6,152	5,653	5,915	6,247	7,176	6,483	6,578

EK-1. (devam) Ra ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Ra Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
39	4,731	4,571	5,833	3,887	3,593	3,726	3,002	3,072	12,361	13,432	5,821
40	5,089	8,142	5,963	5,654	4,949	5,218	4,748	5,072	9,226	7,652	6,171
41	8,062	8,233	6,829	9,04	7,754	8,057	6,011	8,182	9,723	15,597	8,749
42	4,59	5,873	5,018	6,487	6,308	10,451	5,065	5,084	6,343	5,78	6,100
43	15,352	8,217	6,67	2,58	3,698	3,695	4,8	3,469	6,315	7,671	6,247
44	9,623	12	12,986	11,993	10,109	9,696	8,827	7,661	19,968	14,527	11,739
45	7,127	6,333	6,379	3,81	5,218	3,844	4,237	4,269	4,688	7,319	5,322
46	5,371	5,22	5,413	6,004	5,364	6,631	3,806	3,723	6,101	5,832	5,347
47	8,546	7,432	7,772	5,06	3,335	3,845	3,787	3,623	5,222	6,825	5,545
48	3,318	4,329	4,101	3,937	3,747	3,448	4,069	3,988	5,944	5,356	4,224
49	3,989	4,004	5,155	5,542	8,046	5,712	3,723	4,355	6,71	7,456	5,469
50	6,193	6,344	7,637	10,675	10,599	13,008	8,286	8,102	17,039	16,337	10,422
51	4,09	4,113	4,72	5,215	5,891	3,943	4,265	4,301	4,621	5,989	4,715
52	6,41	7,908	7,104	3,999	4,084	4,024	3,875	5,846	5,631	7,925	5,681
53	3,985	5,485	6,928	10,064	13,416	8,873	9,218	13,989	12,498	9,977	9,443
54	5,414	12,649	8,227	14,244	20,482	14,892	8,704	7,864	16,966	15,853	12,530
55	16,204	15,246	17,268	18,236	17,896	15,265	13,268	9,287	13,975	15,359	15,200
56	5,792	5,409	4,556	4,562	3,947	5,059	3,892	3,51	6,308	5,961	4,900
57	18,137	14,516	18,329	16,331	17,655	16,649	11,159	8,922	19,584	14,386	15,567
58	3,162	3,655	6,005	4,393	4,697	6,16	4,694	3,991	9,277	7,343	5,338
59	3,438	4,717	4,759	10,811	6,548	7,71	4,406	4,975	9,322	8,415	6,510
60	7,308	9,513	5,955	4,756	5,455	6,054	4,738	4,308	8,254	6,848	6,319
61	5,286	9,771	7,981	4,444	4,599	4,189	3,588	4,092	11,985	11,274	6,721
62	4,054	3,237	3,29	11,325	15,037	16,69	5,209	3,876	9,998	7,195	7,991
63	10,585	9,831	11,333	6,772	4,264	3,658	4,292	5,266	8,781	13,012	7,779
64	6,63	10,787	12,676	11,933	13,173	16,534	9,707	8,321	16,36	13,427	11,955
65	9,527	7,882	5,797	5,136	4,692	4,621	9,372	4,713	12,21	12,868	7,682
66	8,926	16,59	10,03	15,671	8,611	8,114	7,775	9,437	17,363	14,093	11,661
67	4,719	5,087	4,882	4,918	4,569	3,594	4,86	4,061	8,121	5,482	5,029
68	6,589	4,634	6,487	5,068	4,482	5,498	4,235	6,998	5,912	7,03	5,693
69	4,639	4,596	4,742	5,098	6,725	12,672	4,163	4,012	7,285	6,212	6,014
70	6,203	8,496	7,792	13,137	5,381	5,826	4,668	5,703	11,942	8,263	7,741
71	6,553	7,106	11,257	13,578	21,001	18,806	20,308	14,165	4,91	8,745	12,643
72	7,325	5,241	8,215	5,687	5,368	4,012	5,896	7,985	6,526	7,681	6,394
73	8,24	10,764	6,844	11,771	10,321	4,598	5,188	7,473	9,251	12,954	8,740
74	10,716	14,545	20,102	14,378	12,338	18,446	10,112	11,628	3,267	0,029	11,556
75	15,416	15,076	16,801	5,574	3,891	4,322	6,076	4,329	9,779	11,351	9,262
76	9,866	8,225	10,986	11,33	10,487	11,136	11,182	6,027	12,028	11,512	10,278

EK-1. (devam) Ra ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Ra Değerleri											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
77	15,483	16,612	16,131	21,092	18,53	14,18	16,629	10,854	11,048	16,163	15,672
78	5,177	6,517	7,4	4,092	4,25	3,455	3,443	3,626	8,017	4,25	5,023
79	12,021	7,235	7,856	3,687	3,584	3,685	5,574	4,998	7,684	7,412	6,374
80	8,545	6,055	8,007	6,025	6,247	3,89	6,556	6,859	7,419	4,871	6,447
81	5,624	10,671	7,095	8,032	7,698	15,673	4,304	6,391	10,856	14,355	9,070

EK-2. Rq ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rq Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
1	7,33	8,507	8,052	5,458	6,244	6,073	5,083	5,204	7,219	8,496	6,767
2	6,203	6,605	7,163	6,172	5,705	7,228	4,888	5,28	8,674	9,056	6,697
3	8,802	5,703	6,433	5,157	4,941	5,307	5,741	6,21	6,927	8,579	6,380
4	6,871	6,622	6,918	11,784	17,307	14,033	13,138	12,387	19,477	20,941	12,948
5	15,794	15,21	10,646	4,874	5,471	5,801	6,994	5,55	9,189	12,994	9,252
6	6,744	5,383	5,065	4,967	2,489	3,773	4,563	5,878	6,295	9,552	5,471
7	13,949	15,565	12,15	10,5	7,773	10,644	10,482	10,161	20,752	15,921	12,790
8	7,279	8,097	5,683	6,819	5,047	5,271	7,097	4,987	8,599	9,204	6,808
9	5,791	7,67	5,374	5,515	6,321	5,646	7,262	5,249	7,077	5,739	6,164
10	8,131	8,485	8,125	5,538	9,036	9,581	8,676	10,246	16,633	14,21	9,866
11	7,351	6,133	7,707	5,467	4,775	6,188	4,991	4,392	6,733	7,117	6,085
12	11,944	12,91	7,717	8,559	4,956	6,731	6,45	5,916	10,205	6,327	8,172
13	7,155	6,27	6,266	3,747	5,23	4,874	5,238	5,429	11,55	8,724	6,448
14	6,099	6,143	4,757	4,48	7,463	5,777	4,881	3,933	6,644	12,541	6,272
15	11,49	10,83	12,591	9,271	7,8	6,46	8,455	11,35	13,916	11,352	10,352
16	6,255	6,037	7,834	6,714	5,171	4,399	3,955	5,888	7,587	6,722	6,056
17	11,512	7,57	9,675	5,53	4,154	4,153	7,427	7,271	10,701	9,05	7,704
18	7,706	5,13	5,689	7,135	7,017	6,226	5,261	5,465	7,193	7,616	6,444
19	7,792	10,315	7,881	7,045	5,575	5,251	5,175	5,951	6,646	7,909	6,954
20	5,051	6,652	5,59	5,577	7,267	6,045	5,922	4,993	7,028	7,085	6,121
21	7,956	6,93	6,141	5,617	5,767	5,801	5,006	4,926	9,172	7,439	6,476
22	11,834	9,098	10,039	6,436	5,5	6,132	6,999	5,885	9,016	8,303	7,924
23	21,625	17,629	15,588	16,819	13,315	15,805	16,729	17,465	14,683	22,208	17,187
24	7,34	11,162	14,179	10,346	6,454	6,183	9,471	8,57	13,13	17,29	10,413
25	8,044	5,468	10,574	6,437	5,548	5,338	6,73	12,928	6,39	14,696	8,215
26	7,548	13,811	12,387	10,337	8,09	5,579	6,517	8,793	19,016	12,285	10,436
27	8,482	8,58	9,258	16,537	18,604	6,729	17,74	32,544	18,055	13,963	15,049
28	6,957	5,971	6,878	6,269	4,892	5,456	3,88	5,798	8,593	6,965	6,166
29	16,757	5,214	9,103	16,628	10,447	18,066	8,88	11,243	17,037	18,033	13,141
30	5,919	4,727	4,759	5,339	5,718	5,486	4,568	3,955	5,264	6,096	5,183
31	5,405	5,384	6,905	4,761	4,555	5,485	7,393	4,214	9,59	9,027	6,272
32	6,177	6,692	8,02	7,452	7,707	9,481	6,569	6,316	6,773	8,081	7,327
33	7,653	4,851	4,851	17,033	11,688	13,444	6,04	6,642	15,341	11,252	9,880
34	3,383	5,185	4,924	5,302	5,902	6,804	5,492	4,502	9,119	8,164	5,878
35	7,254	6,601	6,571	6,678	8,233	15,925	6,463	6,622	11,611	8,339	8,430
36	8,3	5,392	7,194	4,704	4,474	4,734	4,427	5,114	9,459	5,431	5,923
37	6,792	6,091	5,521	7,304	13,378	14,026	6,414	5,422	7,916	8,002	8,087
38	6,932	14,293	6,931	6,84	7,322	7,07	7,308	7,621	8,844	7,997	8,116

EK-2. (devam) Rq ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rq Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
39	5,862	5,722	7,287	4,858	4,461	4,718	3,691	3,754	14,427	15,035	6,982
40	6,156	9,673	7,334	6,895	6,127	6,596	5,658	6,221	10,969	9,209	7,484
41	10,164	10,322	8,268	11,081	9,326	9,853	7,077	9,882	12,094	17,901	10,597
42	5,601	6,915	6,146	7,944	7,56	12,433	6,481	5,973	7,575	7,469	7,410
43	20,949	9,771	8,329	3,202	4,413	4,574	5,934	4,318	8,159	9,872	7,952
44	11,551	14,73	15,277	14,827	12,369	11,63	10,752	9,916	23,675	19,641	14,437
45	8,771	7,692	7,777	4,665	6,418	5,336	5,326	5,215	5,674	9,446	6,632
46	6,573	6,554	6,627	7,332	6,635	8,279	4,722	4,651	7,504	7,091	6,597
47	9,923	8,998	9,295	6,007	4,162	4,758	4,584	4,594	6,884	8,536	6,774
48	4,247	5,481	5,162	4,961	4,563	4,283	4,928	4,938	7,618	6,521	5,270
49	4,897	4,849	6,21	6,905	9,851	7,015	4,565	5,325	8,239	8,755	6,661
50	7,668	7,668	9,199	13,529	12,922	16,296	9,759	9,514	21,474	20,544	12,857
51	5,101	5,065	5,961	6,333	6,999	4,936	5,273	5,175	5,711	7,591	5,815
52	8,116	9,541	8,487	4,952	5,072	4,953	4,606	7,115	7,146	9,796	6,978
53	4,809	6,755	8,513	12,196	16,869	11,006	10,853	16,089	16,684	12,085	11,586
54	6,682	14,57	9,639	17,404	24,61	17,494	10,112	9,446	20	19,63	14,959
55	18,325	18,844	21,025	22,255	22,001	19,684	15,547	11,989	18,684	20,215	18,857
56	6,974	6,584	5,718	5,629	4,884	6,345	4,841	4,446	7,834	7,338	6,059
57	21,667	18,194	21,443	20,484	22,087	21,487	13,895	10,604	25,007	18,611	19,348
58	3,929	4,634	7,434	5,223	5,685	7,603	6,299	5,084	10,875	8,63	6,540
59	4,392	5,95	5,745	12,885	8,358	9,451	5,374	6,15	11,552	10,96	8,082
60	8,883	10,915	7,021	6,009	6,603	7,308	5,855	5,204	10,177	8,463	7,644
61	6,42	11,737	10,346	5,158	5,691	5,317	4,503	5,106	15,138	13,942	8,336
62	4,946	4,071	4,196	13,998	18,407	21,492	6,316	4,786	12,306	8,576	9,909
63	13,41	12,846	13,959	8,803	5,152	4,487	5,365	6,762	10,688	14,889	9,636
64	7,864	13,46	15,185	15,025	15,906	20,792	11,369	10,132	20,573	17,076	14,738
65	11,911	10,951	7,271	6,223	5,554	5,585	10,89	5,678	14,431	16,143	9,464
66	11,31	18,822	12,469	19,094	10,165	9,902	9,409	11,603	24,417	17,488	14,468
67	5,677	6,365	5,965	6,046	5,752	4,522	5,973	5,056	10,256	6,837	6,245
68	8,257	5,751	7,867	6,265	5,503	6,901	5,164	8,24	7,335	8,668	6,995
69	5,569	5,808	5,721	5,993	7,999	14,702	5,035	4,952	9,288	7,674	7,274
70	7,864	10,205	9,335	15,549	6,721	7,166	5,737	7,133	13,38	9,797	9,289
71	8,208	8,655	12,86	18,235	24,285	22,397	24,049	17,148	7,658	11,731	15,523
72	9,022	6,654	10,228	7,011	6,985	5,028	7,214	9,368	8,689	8,669	7,887
73	9,479	12,516	8,236	14,268	13,037	5,377	6,563	9,247	11,587	15,506	10,582
74	13,515	18,53	25,153	20,133	16,849	24,101	12,257	15,353	5,199	0,038	15,113
75	18,641	18,694	19,702	6,931	4,563	5,33	7,266	5,081	12,072	14,516	11,280
76	12,056	9,589	13,426	13,768	12,372	13,738	13,496	7,466	15,727	14,882	12,652

EK-2. (devam) Rq ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rq Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama
77	17,789	19,999	20,477	24,489	21,945	17,083	19,164	12,944	16,603	21,736	19,223
78	6,665	7,994	8,893	4,981	4,834	4,248	3,907	4,427	9,553	5,173	6,068
79	14,251	8,641	9,322	4,221	4,258	4,126	6,898	6,668	9,22	9,225	7,683
80	10,415	7,558	10,296	7,15	7,63	4,984	7,907	7,849	9,124	5,796	7,871
81	6,869	12,99	8,678	9,344	9,159	20,195	4,996	7,382	13,522	16,865	11,000

EK-3. Rt ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rt Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
1	39	49,32	50,28	28,07	34,76	32,62	30,67	32,22	37,6	50,18	38,472
2	37,62	45,89	42,32	31,17	35,53	44,7	27,1	27,94	49,95	48,33	39,055
3	58,27	35,12	35,1	28,42	26,03	33,44	31,48	37,29	47,24	53,23	38,562
4	32,99	32,68	32,31	56,36	122,2	85,48	90,18	65,4	115,4	121,65	75,465
5	87,17	91,12	60,74	29,9	29,37	42,52	37,46	35,65	71,05	83,33	56,831
6	33,44	30,92	33,85	26,98	15,52	24,48	28,31	31,23	39,42	54,26	31,841
7	72,27	103,08	72,67	58,68	38,33	50,41	51,76	49,11	126,93	75,82	69,906
8	37,49	40,96	29,46	41,31	34,34	30,14	48,63	28,04	44,98	52,76	38,811
9	40,44	40,57	30,78	32,42	30,85	28,26	42,87	29,42	49,99	36,45	36,205
10	43,71	43,03	46,06	48,05	54,86	46,23	41,14	49,79	98,17	89,04	56,008
11	43,41	35,06	44,11	32,83	26,98	31,69	31,24	27,88	38,65	40,41	35,226
12	69,56	84,07	41,35	49,13	27,57	34,34	34,99	36,26	56,95	32,18	46,640
13	41,75	39,6	29,1	20,98	28,58	24,69	30,57	30,81	83,41	41,32	37,081
14	30,7	37,41	28,54	31,17	47,71	35,11	25,19	23,127	38,49	74,64	37,209
15	57,21	56,33	72,77	47,09	41,34	34,89	46,22	71,58	74,92	57,48	55,983
16	32,04	27,05	46,64	40,4	27,15	29,84	25,85	32,41	36,55	42,9	34,083
17	72,15	46,37	56,2	32,21	28,26	21,57	41,51	35,44	57,12	48,91	43,974
18	46,16	32,09	32,47	43,65	44,96	37,83	28,92	34,22	36,36	48,98	38,564
19	41,24	59,25	46,63	38,75	39,63	34,21	28,79	32,81	39,12	55,48	41,591
20	29,1	33,57	39,41	33,04	45,69	45,23	31,86	32,38	36,19	35,96	36,243
21	52,37	33,61	38,01	31,6	30,27	31,63	29,98	27,01	44,85	39,42	35,875
22	63,13	50,3	56,77	36,21	29,56	33,11	35,87	32,26	49,83	60,31	44,735
23	103,57	102,04	84,5	90,95	82,64	77,96	92,11	91,63	89,37	121,55	93,632
24	50,94	56,4	77,1	52,02	36,97	37,82	45,75	48,43	62,29	94,19	56,191
25	41,92	32,56	66,27	37,79	33,38	35,87	47,26	94,63	35,42	99,45	52,455
26	42,33	80,11	74,47	52,81	43,22	30,45	36,4	56,44	117,21	65,13	59,857
27	50,43	50,08	49,23	86,32	79,1	34,05	85,81	113,29	111,2	88,74	74,825
28	36,42	35,49	37,58	33,39	27,34	33,94	20,62	35,57	49,96	36,45	34,676
29	70,27	27,41	40,04	86,84	72,49	79,84	46,7	70,13	81,88	79,5	65,510
30	33,94	28,91	30,4	29,25	30,59	34	29,91	23,52	36,42	39,69	31,663
31	29,87	34,46	42,51	26,21	26,83	26,57	42,097	23,95	63,28	62,83	37,861
32	32,55	47,39	48,14	46,48	46,73	59,01	35,85	37,71	39,27	44,48	43,761
33	44,42	31,2	31,39	101,82	45,28	74,49	33,8	52,67	83,73	66,21	56,501
34	26,3	26,11	29,14	34,03	33,92	37,07	30,09	25,45	49,88	41,62	33,361
35	40,67	40,34	36,74	39,14	50,54	88,56	32,71	42,51	75,21	53,35	49,977
36	47,56	27,96	42,11	28,02	25,46	23,82	26,42	31,44	55,13	32,65	34,057
37	39,52	33,65	29,38	43,21	85,56	69,24	35,92	31,43	50,49	49,84	46,824
38	35,07	83,32	40,09	31,23	38,68	47,43	41,51	44,37	48,95	50,41	46,106

EK-3. (devam) Rt ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rt Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
39	40,98	37,93	41,72	28,77	25,78	28,41	20,98	22,39	77,83	72,5	39,729
40	37,86	48,72	39,13	38,42	33,95	41,57	29,95	33,78	55,83	44,21	40,342
41	52,47	64,61	41,81	57,19	60,97	49,51	43,35	51,75	66,59	93,88	58,213
42	34,24	39,58	33,69	45,84	42,75	77,02	36,17	41,11	43,02	43,67	43,709
43	145,61	50,63	45,6	16,36	33,66	33,69	33,77	26,19	43,47	57,4	48,638
44	51,36	67,22	73,13	72,45	63,88	49,22	49,01	48,97	121,27	126,93	72,344
45	51,52	53,35	44,63	27,46	36,3	39,91	28,34	30,89	31,67	59,71	40,378
46	35,89	37,01	37,59	44,68	42,45	45,83	31,31	28,37	42,55	43,94	38,962
47	53,21	52,02	56,15	30,09	23,23	26,46	23,74	27,61	54,75	46,97	39,423
48	25,76	31,96	28	31,95	28,98	27,9	24,59	27,55	43,5	39,57	30,976
49	26,96	28,19	32,52	35,88	49,54	36,89	27,21	35,24	52,99	56,72	38,214
50	45,93	38,19	53,74	82,11	7,62	91,13	42,68	42,1	112,29	144,93	66,072
51	26,25	28,66	35,15	33,67	38,59	31,54	29,99	28,18	32,85	46,88	33,176
52	65,16	52,4	54	25,23	29,42	31,68	23,08	38,36	50,56	51,95	42,184
53	28,37	36,07	50,77	69,66	103,14	66,37	56,13	89,26	99,68	83,81	68,326
54	42,2	71,2	49,19	105,47	108	76,49	51,97	46,35	102,53	100,38	75,378
55	85,68	100,21	105,69	112,87	122,87	90,65	78,99	60,98	133,27	117,87	100,908
56	32,97	33,8	33,76	32,74	28,84	33,56	26,48	29,1	48,42	36,9	33,657
57	97,1	102,02	96,13	112,07	123,05	134,76	75,94	50,78	142,98	110,07	104,490
58	23,35	29,92	48,66	33,22	32,25	47,59	38,02	30,22	71,63	46,74	40,160
59	27,95	34,33	35,69	62,28	49,89	58,14	29,87	32,19	66,01	83,32	47,967
60	44,87	54,17	36,31	34,6	40,36	37,36	32,92	27,83	55,34	59,202	42,296
61	40,99	63,4	55,24	24,96	36,57	31	27,51	27,41	82,58	80,82	47,048
62	28,77	28,04	24,95	90,82	114,12	127,67	29,87	29,2	65,17	46,01	58,462
63	79,05	77,55	76,49	58,77	27,4	25,7	30,54	39,44	54,29	71,37	54,060
64	42,1	70,28	77,55	78,01	62,1	116,77	53,59	67,05	106,32	104,73	77,850
65	73,66	74,85	44,55	36,41	27,84	28,78	56,89	28,35	80,7	88,6	54,063
66	59,65	73,32	63,02	90,84	49,89	51,61	50,76	52,41	129	94,25	71,475
67	29,36	44,31	37,95	34,59	30,88	27,53	30,98	31,04	84,48	39,73	39,085
68	50,11	33,29	42,84	38,57	29,39	41,7	27,78	35,24	47,83	47,51	39,426
69	28,77	31,59	32,49	32,28	38,33	70,87	29,18	29,05	59,09	37,03	38,868
70	54,04	47,53	51,27	83,9	40,24	46,85	28,61	52,7	68,88	52,52	52,654
71	38,49	48,56	61,45	113,5	133,1	98,4	118,66	84,83	116,03	103,09	91,611
72	47,25	42,25	63,54	35,69	38,11	36,21	42,36	61,24	40,58	60,21	46,744
73	46,6	50,84	41,35	99,66	87,59	31,65	39,82	54,24	69,43	89,58	61,076
74	76,46	100,48	147,76	116,41	128,75	116,21	67,54	99,44	79,91	0,29	93,325
75	110,4	98,19	84,62	49,47	21,73	28,78	34,61	25,69	56,39	75,89	58,577
76	63	43,15	63,82	67,22	54,88	62,52	67,21	46,79	98,22	108,35	67,516

EK-3. (devam) Rt ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rt Değerleri (µm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
77	75,22	97,38	121,83	113,12	121,23	85,39	83,89	67,14	128,87	126,74	102,081
78	48,28	48,47	49,58	26,83	28,52	21,52	20,58	26,98	42,14	26,15	33,905
79	92,25	48,66	49,6	24,33	30,21	27,68	39,32	29,54	48,27	52,98	44,284
80	58,51	52,89	59,33	33,64	43,27	37,91	40,35	37,84	59,17	31,98	45,489
81	30,51	58,68	45,57	51,11	48,63	105,92	25,6	33,84	96,3	76,46	57,262

EK-4. Rz ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rz (μm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
1	28,92	34,769	30,814	24,572	29,128	27,861	25,697	24,666	33,622	38,111	29,816
2	28,766	31,023	29,573	25,801	27,06	32,657	22,135	22,599	32,816	37,516	28,995
3	40,289	26,184	26,553	23,549	22,095	26,289	25,989	26,778	33,183	37,518	28,843
4	24,258	26,532	26,737	42,386	67,611	49,285	52,984	44,264	65,416	81,7	48,117
5	57,366	55,633	40,583	23,547	23,842	29,77	29,556	24,964	37,977	45,539	36,878
6	29,068	26,482	24,762	20,236	10,308	15,727	22,413	25,98	28,699	37,191	24,087
7	56,455	58,986	49,092	41,265	31,672	38,831	37,899	38,295	80,57	55,18	48,825
8	30,75	31,386	24,817	26,228	23,063	22,267	28,918	19,88	33,72	36,689	27,772
9	25,523	30,719	23,057	25,21	24,841	22,848	27,908	23,343	30,971	26,933	26,135
10	30,593	34,28	34,761	19,97	31,484	36,163	31,185	38,024	62,881	53,64	37,298
11	32,557	25,934	30,926	23,041	20,693	26,919	21,625	21,847	29,312	29,613	26,247
12	47,687	46,437	32,189	37,313	23,974	30,613	29,368	27,429	40,211	25,289	34,051
13	30,245	27,065	23,973	17,616	24,214	22,586	25,206	23,872	41,766	33,814	27,036
14	25,779	27,435	18,829	21,655	32,02	22,579	20,801	18,581	27,291	44,773	25,974
15	46,289	44,125	52,291	34,587	31,684	25,464	36,81	41,603	50,315	44,219	40,739
16	24,984	21,023	26,79	27,616	24,063	19,198	16,504	23,796	28,679	31,761	24,441
17	43,81	29,619	35,994	24,558	19,133	19,172	29,976	28,803	38,822	35,672	30,556
18	35,824	23,815	27,657	29,223	31,051	28,744	26,075	27,279	30,823	34,367	29,486
19	32,237	41,582	35,608	30,435	27,394	22,977	23,094	26,587	21,278	36,635	29,783
20	24,12	27,195	26,265	22,834	29,131	28,243	26,435	23,603	26,316	29,429	26,357
21	31,611	29,692	28,335	24,748	26,279	26,353	24,825	23,072	37,503	30,147	28,257
22	41,719	36,413	41,497	28,51	27,065	26,855	30,004	25,997	34,97	33,562	32,659
23	71,746	68,634	57,418	60,637	52,108	56,201	56,906	61,342	58,19	83,704	62,689
24	30,552	39,298	51,045	39,34	26,014	27,484	36,012	36,346	50,552	59,447	39,609
25	31,872	23,56	38,477	30,374	21,859	24,544	27,863	56,47	29,139	55,441	33,960
26	30,25	47,982	44,435	37,517	30,921	22,704	28,193	34,95	70,089	43,781	39,082
27	31,239	33,715	35,445	61,029	68,445	23,702	70,574	102,504	74,158	48,127	54,894
28	30,823	26,915	30,893	25,578	21,683	24,95	17,461	26,15	35,428	32,834	27,272
29	54,341	20,901	35,025	61,598	43,079	61,064	34,036	41,852	60,51	63,85	47,626
30	24,304	22,659	22,096	22,976	24,062	23,94	21,402	18,288	21,024	26,693	22,744
31	24,859	25,867	27,678	21,735	20,215	22,967	30,29	19,149	40,492	35,191	26,844
32	27,284	30,161	35,52	32,753	35,593	40,488	29,764	29,284	31,105	34,787	32,674
33	28,808	23,277	21,802	58,937	34,259	49,63	26,427	31,07	58,417	41,591	37,422
34	13,736	23,015	23,348	24,942	26,953	25,683	23,383	22,033	36,728	32,042	25,186
35	33,51	29,385	27,877	30,941	35,865	59,148	28,095	32,252	51,78	36,224	36,508
36	33,272	22,106	27,858	21,259	20,342	22,005	21,013	23,891	39,12	25,195	25,606
37	30,407	26,701	24,231	32,38	49,579	52,14	28,213	25,801	37,213	35,911	34,258
38	29,436	53,977	29,204	27,681	31,275	35,617	35,986	33,196	40,865	38,507	35,574

EK-4. (devam) Rz ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rz (μm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
39	26,286	24,497	31,779	22,061	21,168	55,586	17,928	17,226	52,862	49,567	31,896
40	28,194	39,131	30,005	28,635	27,377	32,001	24,909	27,875	40,095	37,44	31,566
41	37,296	41,914	32,707	41,85	34,556	36,192	28,035	36,179	44,122	61,662	39,451
42	25,315	24,324	25,11	31,405	27,953	50,89	26,919	25,661	32,906	33,098	30,358
43	89,868	38,67	33,323	12,314	17,386	20,6	26,419	18,646	35,933	42,393	33,555
44	40,201	55,258	51,005	55,328	45,394	43,539	39,676	39,23	84,968	73,379	52,798
45	34,871	27,263	32,045	20,449	26,106	28,195	23,591	23,22	24,835	35,91	27,649
46	28,669	27,785	30,032	34,488	31,068	39,084	22,434	20,627	34,292	30,576	29,906
47	35,313	29,459	31,244	24,657	19,751	20,803	20,294	21,442	27,679	34,703	26,535
48	19,766	23,389	24,469	23,718	20,249	19,04	21,344	22,885	32,72	26,023	23,360
49	21,455	22,204	26,173	29,729	35,255	28,056	20,764	24,899	32,816	33,978	27,533
50	26,501	27,021	35,059	50,35	51,382	63,874	34,715	34,502	71,842	80,191	47,544
51	22,173	21,236	27,495	27,463	27,83	24,909	23,266	22,001	24,453	32,137	25,296
52	36,886	32,168	35,604	19,577	23,342	22,569	18,732	29,981	29,531	41,329	28,972
53	21,379	27,906	34,358	49,954	70,085	39,51	39,537	52,544	69,044	41,251	44,557
54	25,497	49,395	34,257	63,299	88,277	62,277	34,174	35,206	79,199	74,583	54,616
55	62,548	70,264	76,62	83,257	82,567	71,021	59,369	46,258	83,487	79,652	71,504
56	27,794	26,563	23,886	24,551	22,598	27,313	21,062	21,382	35,759	30,263	26,117
57	78,321	72,463	75,016	84,852	83,311	86,202	54,353	37,462	96,896	72,408	74,128
58	18,172	22,16	32,465	21,945	20,386	27,472	27,942	22,429	41,86	34,611	26,944
59	22,37	24,111	25,038	48,695	33,142	37,969	23,608	25,801	48,122	44,445	33,330
60	36,754	40,281	28,711	39,623	28,879	31,678	25,992	23,819	45,645	39,344	34,073
61	27,128	46,589	44,306	20,117	25,406	24,064	21,366	23,593	55,108	51,768	33,945
62	22,142	21,209	19,975	58,767	78,846	82,738	24,603	20,598	44,68	34,652	40,821
63	52,356	50,378	48,339	34,596	21,65	20,245	23,034	31,439	43,537	51,258	37,683
64	29,014	51,788	56,292	46,537	54,939	83,57	38,742	38,435	77,326	60,327	53,697
65	42,949	42,646	25,336	25,568	19,499	20,838	37,842	21,202	49,42	57,246	34,255
66	43,828	63,626	45,917	65,437	37,507	36,618	33,772	41,454	96,375	59,452	52,399
67	24,254	27,744	26,843	23,283	26,008	21,644	25,185	22,931	35,011	33,016	26,592
68	39,211	27,961	35,156	28,348	26,631	33,686	21,434	23,578	34,155	37,239	30,740
69	23,762	24,464	23,669	22,591	30,342	54,353	21,055	21,048	35,252	30,745	28,728
70	34,151	38,624	36,788	55,309	30,51	35,25	24,748	30,815	48,402	36,435	37,103
71	29,563	31,967	45,332	72,428	86,64	80,329	84,17	65,547	31,172	51,069	57,822
72	33,684	25,478	37,598	29,325	28,264	20,335	29,268	41,021	31,258	35,684	31,192
73	36,533	54,155	29,319	57,827	52,132	19,625	30,255	39,512	47,011	58,575	42,494
74	51,129	73,638	98,636	87,498	70,672	96,705	41,173	54,688	23,409	0,252	59,780
75	70,021	63,717	63,901	26,714	17,134	21,159	28,025	17,833	38,556	54,172	40,123
76	43,384	34,667	51,771	44,91	46,46	50,387	48,623	29,201	61,874	57,068	46,835

EK-4. (devam) Rz ölçüm değerleri

Pürüzlülük Ölçümü Rz (μm)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
77	59,784	72,375	80,963	88,67	80,998	64,76	66,748	48,51	70,704	93,573	72,709
78	29,403	31,806	35,742	21,603	16,457	19,244	13,391	20,651	32,146	21,716	24,216
79	62,215	33,324	34,264	15,567	18,235	20,325	27,325	26,325	36,698	37,339	31,162
80	40,256	30,795	39,203	28,348	32,607	16,46	33,657	28,386	34,848	23,223	30,778
81	23,386	47,366	34,327	34,677	34,275	80,523	19,819	27,912	51,807	58,51	41,260

EK-5. Yüzey sertliği ölçüm değerleri

Yüzey Sertliği Ölçüm Değerleri (HRA)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
1	55,5	52,5	52,4	57,1	57,4	50,3	54,5	51	57,7	56,7	54,5
2	52	52,4	54,1	57,7	56,2	53,6	55,1	55,4	57,9	56,7	55,1
3	52	56,2	54,9	56,7	55,2	51,9	52,2	53,4	56,7	55,6	54,5
4	47,5	44	49	47,8	48,9	40,5	48	52	46,7	49,5	47,4
5	53,2	50,5	54,6	55,9	55,1	52,7	50,3	52,8	54,5	54,1	53,4
6	52,2	48,6	48,9	49,7	48,4	52,8	53,9	54,2	53,3	49	51,1
7	52	49,4	48,2	53,1	54,7	49	49,1	48	53,3	54,8	51,2
8	48,2	52,6	53	50,2	50,7	50,2	46,2	46,5	51	49,8	49,8
9	46,5	52,1	54	49,2	51,4	49,2	53,1	49	51,6	50,8	50,69
10	52	48	53	54,5	55,9	52	53	49	55,2	54,6	52,7
11	53,1	51,5	52,4	53,4	54,9	53	52,1	51,1	50	50,7	52,2
12	56,2	57,3	54,2	53,7	54,9	56,1	55,5	54,3	55,7	55,8	55,4
13	48,2	52,5	51,2	55,3	49,1	51,2	50,3	53,7	52,6	50,1	51,4
14	50,9	47	47,5	51	50,3	48,2	51,6	48,4	48,7	49,2	49,28
15	46,4	50,8	45,2	49,9	51,3	51,6	49	48,3	52,7	50,9	49,6
16	49,7	50,6	47,8	47,3	50	51,3	50,1	52,7	52,5	49,3	50,1
17	52,7	53,7	52	53,9	52,7	54,2	53,8	52,6	50,4	49,3	52,5
18	49,5	49	52,1	54,3	54	48,9	49,4	50	52,3	53,2	51,3
19	53,3	55,6	55,3	56,3	52,7	53,7	56,3	55,1	52,8	54,5	54,6
20	44,6	49,5	52,1	53,5	52,5	52,3	51,5	49	53,2	54,9	51,3
21	49,1	51,1	52,2	55,6	55,3	48,7	53,6	54,1	54,7	56,5	53,1
22	52,9	54,4	52,3	54,6	55,3	51,9	52,8	53,6	55	55,6	53,8
23	46,6	47,1	47,6	49,5	49	47,3	48,2	45,6	46,2	46,1	47,3
24	49,6	52,6	55,9	53,2	50,1	54,8	55,6	53,2	52	53,8	53,1
25	51,7	55,8	48,9	51,1	51,5	51,4	52	46,7	52,6	53,2	51,5
26	45,2	51,2	50	52,5	53,3	46,1	49,8	52,5	54,3	53,9	50,9
27	45,7	48,6	47,1	50,3	49,2	50,7	51,7	47,6	47,4	48,3	48,7
28	53	49,2	50,9	56,9	56,8	53,6	54,3	51,5	57,9	57,8	54,2
29	53,2	52,5	55,9	53,1	51	47,2	48,3	49	49,3	48,3	50,8
30	50,5	51,4	52,2	50,1	49,3	48,2	51	52,7	49,8	53,5	50,9
31	48,6	49	48,2	52,4	51,6	47,4	49,5	52,1	53,3	51,7	50,4
32	53,4	51,7	54,9	55,9	53,6	52,4	56,4	55,6	54,2	52,7	54,1
33	52,4	54	53,9	52,7	55,6	49,8	50,8	52,5	53,2	54,3	52,9
34	50,1	51,2	51,5	53,6	54,2	51	54,7	53,8	53,2	53	52,6
35	55,3	53,5	52,6	56,3	55,7	54,2	49,8	50,7	54,6	53,7	53,6
36	49,6	51,2	52,4	52,3	54,6	46,3	53,5	52,4	49,7	52,6	51,5
37	47,9	54,3	53,5	54	52,6	50,9	54,3	55,6	54,3	55,1	53,3
38	55,2	53,2	56,3	53,2	50,7	52,3	53,9	54,3	55,3	52,1	53,7

EK-5. (devam) Yüzey sertliği ölçüm değerleri

Yüzey Sertliği Ölçüm Değerleri (HRA)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
39	44,8	50,7	49,5	54,9	53,5	51	50	50,3	54,3	54,2	51,3
40	55	51,1	51	56,7	57,6	53,5	54,3	53,9	56,2	57,1	54,6
41	53,7	52,1	52,9	55,7	53,7	50,2	52,3	54,7	49,6	51,9	52,7
42	53,5	50,7	53	50,2	49,3	51,1	51,5	55,5	50,6	50,1	51,6
43	47	50,4	50,5	55	54,3	48,4	53	51,6	54,5	54,7	51,9
44	48	50,5	48,5	48,7	46,9	49,5	47	42,5	45,3	46	47,3
45	49,4	50,3	51,4	52,9	48,7	51,6	49,3	49,6	51,3	50,1	50,5
46	54,7	55,6	51,6	54,6	54,3	54,9	55,7	53,7	53,6	54,3	54,3
47	49,6	49,8	51,6	49,6	48,2	48,6	50,3	52,7	53,9	54,7	50,9
48	50	52,5	46,5	47,6	48,2	54,5	52,5	51	49,3	51	50,3
49	50,5	51	54	51,5	53,7	50,5	52,7	53,6	54,6	54,7	52,7
50	47,5	46,5	43	46,8	47,9	44	45,6	43,9	48,2	48	46,1
51	50	51	51	49,3	48,7	47,5	50,5	51,5	48,6	49,2	49,7
52	50,4	51,6	53,2	52,9	50,3	51,6	52,9	53	52,7	50,7	51,9
53	47,8	51,2	50	52,4	53,4	50,2	50,9	52,1	53,5	52	51,4
54	49,5	52	54,5	48,6	48,4	47	42,5	51	46,1	45,8	48,5
55	52,3	53,6	51	50,9	47,6	49,8	48,5	51,3	50,4	49,6	50,5
56	52,6	46	51,6	51,3	49,7	52,3	52,1	47,1	48	48,6	49,9
57	49,1	45	47,6	49,3	50,1	48,9	45,6	50	50,7	51,6	48,8
58	49,4	52,7	49,5	49,6	50,6	50,4	50,1	51,1	51,7	52,9	50,8
59	53,5	50,4	50,9	52,6	53,7	51,9	53,2	52,9	50,6	51	52,1
60	50,3	54,4	55,4	54,8	51,6	54,9	55,7	54,3	55,3	54,1	54,1
61	50	48,4	49,5	55,3	54,9	50,4	52,7	48	54,8	55,9	52,0
62	51,6	49,6	45,7	52,9	51,7	50,5	52,4	46,7	51,6	54,3	50,7
63	51,5	49,2	48,8	55,6	55,7	45,9	49,9	50	56,6	54,9	51,8
64	44,5	47,4	47,1	49,2	50,3	51,2	50,1	48,3	48,4	49,6	48,6
65	45,2	48,4	44,5	44	44,2	45,7	50	44,6	44,9	45,7	45,7
66	49,4	47,1	47,3	49	48,6	46,5	45	48,4	48,5	47,1	47,7
67	54,8	53,3	49,1	51,4	52,1	52,6	51,4	52,2	49,7	46,7	51,3
68	50,3	54,1	53	53,6	54,5	52,5	52	54,8	56,8	57,3	53,9
69	51,1	54,6	52,3	51,1	48,6	50,3	47,8	49,1	48,3	47,7	50,1
70	49,4	50,3	54,7	55,7	55,9	55,1	52,5	55,2	56,3	55,9	54,1
71	46,6	54,1	45,2	50	50,2	50,5	47,8	48	47,2	49,1	48,9
72	49,1	53,3	54,3	54,7	52,7	48,3	49,6	49	48,7	52,3	51,2
73	52	55	56,8	55,6	53,7	52	52,4	49	55,7	53,8	53,6
74	43,5	48,6	45,9	46,2	46,7	49,2	50	46,5	46,9	46,8	47,0
75	48,5	48,5	46,5	46,2	46,7	39,5	46	47	45,8	46,5	46,1
76	44	48,8	47,6	47,3	48,2	49,8	50	45,5	45,2	45,6	47,2

EK-5. (devam) Yüzey sertliği ölçüm değerleri

Yüzey Sertliği Ölçüm Değerleri (HRA)											
Parça No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ort.
77	52	53	47	53,3	51,7	44	45	43,5	49,8	50,9	49,0
78	52,9	48	53,7	52,6	53,7	50,8	53,5	51,2	52,6	53,5	52,3
79	49,2	51,3	52,9	54,8	54,3	51,6	52,8	51,1	49,9	52,8	52,1
80	52,2	52,5	55,5	50,1	51,5	48,9	55,2	51	52,6	50,3	52,0
81	43,5	46,2	48,9	44,8	45,9	44,1	49	43,5	47,2	45,3	45,8

EK-6. Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü

ITAB Büyüklüğü (μm)				
Parça No	1	2	3	Ort.
1	921,349	918,636	925,599	921,86
2	922,761	959,496	956,624	946,29
3	901,957	918,532	928,404	916,30
4	492,471	474,087	407,786	458,11
5	847,984	852,217	860,680	853,63
6	781,280	763,335	774,657	773,09
7	849,391	852,242	877,665	859,77
8	737,992	706,866	694,192	713,02
9	620,817	643,394	623,717	629,31
10	835,358	867,826	884,669	862,62
11	675,844	704,063	689,990	689,97
12	869,149	897,391	926,994	897,84
13	694,188	740,814	771,835	735,61
14	620,819	601,064	644,859	622,25
15	915,814	898,792	863,615	892,74
16	725,240	682,905	656,105	688,08
17	829,648	840,968	881,871	850,83
18	846,570	848,022	852,255	848,95
19	895,952	874,806	904,445	891,73
20	764,766	793,134	780,256	779,39
21	897,373	919,939	945,362	920,89
22	960,906	948,209	938,433	949,18
23	483,988	479,724	461,382	475,03
24	822,613	838,103	822,588	827,77
25	798,676	773,328	786,080	786,03
26	800,132	812,726	833,875	815,58
27	481,166	531,927	613,764	542,29
28	1017,302	948,167	952,407	972,63
29	498,137	501,173	481,133	493,48
30	787,314	777,536	774,900	779,92
31	836,750	845,159	836,751	839,55
32	860,794	819,839	867,743	849,46
33	956,624	871,971	883,282	903,96
34	805,671	831,068	867,751	834,83
35	901,706	927,032	883,258	904,00
36	792,694	781,667	783,158	785,84
37	852,270	869,145	838,104	853,17
38	859,286	849,486	863,640	857,47

EK-6. (devam) Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü

ITAB Büyüklüğü (μm)				
Parça No	1	2	3	Ort.
39	815,859	839,557	802,834	819,42
40	949,578	934,048	990,630	958,09
41	815,650	828,231	818,351	820,74
42	733,698	749,219	677,349	720,09
43	774,612	785,918	798,628	786,39
44	428,928	451,512	434,581	438,34
45	744,982	699,836	719,596	721,47
46	935,545	886,093	884,756	902,13
47	737,927	733,742	718,340	730,00
48	649,075	667,392	692,777	669,75
49	759,102	795,855	753,553	769,50
50	468,435	448,701	440,236	452,46
51	586,982	620,819	687,133	631,64
52	777,444	808,622	860,680	815,58
53	876,209	921,376	931,235	909,61
54	430,422	461,380	443,074	444,96
55	536,207	513,587	544,626	531,47
56	706,936	725,229	733,698	721,95
57	627,878	677,279	643,394	649,52
58	829,648	833,889	812,882	825,47
59	777,536	753,531	805,656	778,91
60	904,435	819,791	811,295	845,17
61	907,310	886,131	832,464	875,30
62	793,078	749,235	742,422	761,58
63	822,704	831,059	828,231	827,33
64	589,791	551,683	601,388	580,95
65	428,965	450,128	396,567	425,22
66	465,632	464,211	383,778	437,87
67	798,598	740,769	768,999	769,46
68	911,474	932,675	874,798	906,32
69	783,081	749,298	695,597	742,66
70	918,545	893,185	888,988	900,24
71	479,797	447,271	474,131	467,07
72	756,333	753,479	725,249	745,02
73	867,734	845,200	855,053	856,00
74	546,039	455,756	450,095	483,96
75	502,305	517,820	481,152	500,43
76	389,432	457,149	426,109	424,23

EK-6. (devam) Isı tesiri altındaki bölge büyüklüğü

ITAB Büyüklüğü (μm)				
Parça No	1	2	3	Ort.
77	644,805	564,386	536,177	581,79
78	747,888	718,223	709,821	725,31
79	816,950	822,588	836,703	825,41
80	783,077	788,822	764,781	778,89
81	471,276	459,971	386,602	439,28

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TÜKEL, Taha
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.03.1989, Kütahya
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (312) 267 14 91
 e-mail : taha.tukel@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi / Makina Mühendisliği	2012
Lise	Konuralp Koleji / Fen Bilimleri	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	CRRC-MNG Raylı Sistem Araçları Tic. Ltd. Şti.	Satın alma Şefi
2016-2017	E-Berk Makine Metalürji A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2013-2016	Metro İstanbul A.Ş.	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Tükel, T. (2019, 20-22 Aralık). *Lazer ile Kesim Parametrelerinin Deney Tasarım Yöntemi ile En İyilenmesi*. Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Sosyal Bilimlerde Güncel Gelişmeler Sempozyumu, Ankara.

Hobiler

Kitap okuma, yüzme, tenis, motor sporları, seyahat



GAZİ GELECEKTİR..