EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(DOKTORA TEZİ)

LAZERLE OYMA İŞLEM PARAMETRELERİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

Şefika KASMAN

Tez Danışmanı : İ. Etem SAKALAKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu : 625.01.00
Sunuş Tarihi : 13.09.2010

Bornova-İZMİR

2010

Şefika KASMAN tarafından Doktora tezi olarak sunulan "Lazerle oyma işlem parametrelerinin yüzey özelliklerine etkilerinin incelenmesi ve optimizasyonu" başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 13.09.2010 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri: **İmza**

Jüri Başkanı :

Prof. Dr. Vural CEYHUN

Raportör Üye :

Yrd. Doç .Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Üye : Prof. Dr. Rasim İPEK

Üye : Doç .Dr. Ahmet KARAASLAN

Üye : Yrd. Doç .Dr. Çiçek ÖZES

ÖZET

LAZERLE OYMA İŞLEM PARAMETRELERİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

KASMAN, Şefika

Doktora Tezi, Makine Mühendisliği Bölümü
Tez Yöneticisi: Yrd. Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU
Eylül 2010, 263 sayfa

Mikro boyuttaki kalıplar, karmaşık geometriye ve yüksek sertliğe sahip işlenmesi zor iş parçalarının, geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi zordur. Bunun yanı sıra seri imalatta da süre ve maliyet yönünden sıkıntılar yaratmaktadır. Özellikle mikro ölçekteki kalıp ve/veya kalıp parçaları biyomedikal, elektronik, bilgisayar endüstrisindeki parçaların üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kalıplardaki küçük ölçülerdeki yada dar toleranslardaki detaylar için hassas işleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Lazer oyma bu konuda hassas ölçü toleransları ve işlem görmüş yüzeyde sağladığı iyi yüzey kalitesi ile geleneksel yöntemlere alternatif bir yöntemdir. Lazer işleme sistemlerinin hepsinde kesici takım olarak lazer ışınının kullanılması takım kaynaklı hataları (aşınma, gerilme, mikro çatlaklar) da elimine etmektedir. Bu avantajları ile lazerle oyma yöntemi, mikro boyuttaki parçaların ve kalıpların imalatında alternatif ve gelişmeye açık bir yöntem olarak görülmektedir.

Bu tez çalışmasında AISI H13, AISI 316, AA 7075 ve Tungsten Karbür gibi farklı malzeme çeşidi için lazerle derin oyma işlemi yapılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında öncelikle lazer çıkış gücü, ışın tarama hızı, frekans ve tarama aralığı gibi dört temel işlem parametresinin ve ek olarak lazer ışının hareket yönünün yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisi incelenmiştir.

Temel parametrelerden her biri için minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum oyma derinliği sağlayan optimum değerler seçilmiş ve bunlar için mesafeye bağlı sertlik değişimi ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerle minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum oyma derinliği için Taguchi metodu ile varyans analizi yapılmıştır. Bununla birlikte, regresyon analizi ile matematiksel modelleme yapılmıştır.

Anahtar sözcükler: Lazerle oyma, Yüzey pürüzlülüğü, Oyma derinliği, Regresyon

ABSTRACT

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF THE EFFECT OF LASER ENGRAVING PROCESS PARAMETERS ON THE SURFACE PROPERTIES

KASMAN, Şefika

Ph.D. in Mechanical Eng.
Supervisor: Assist. Prof. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU
September 2010, 263 pages

The mould parts in micro size and the workpiece having high hardness and complex geometry is difficult to machine by conventional machining methods. Besides this, it causes some difficulties in terms of cost and time in the serial production. The mold parts and / or molds in micro size are used in biomedical, electronic, computer industries. The precision machining methods must be used for small details or tolerances in these molds and its parts. The laser engraving is an alternative method when compared by conventional machining methods due to provide precise tolerances and best surface quality on the machined surface. All of laser machining methods are used a laser beam as cutting tool and thus, the cutting tool based problem (wear, crack, stress) can be eliminated. Due to these advantages, laser engraving method is seen as an alternative and can be developed method.

In this thesis, the laser engraving applications were performed on the four different metal materials such as AISI H13, AISI 316, AA 7075 and Tungsten Carbide (WC-Co). In the context of experimental studies firstly, the effect of basic process parameters namely laser output power, scan speed, frequency and fill spacing and in addition the scan direction of laser beam for minimum surface roughness and maximum engraving depth was investigated. The optimum value of parameters given minimum surface roughness and maximum engraving depth was determined. For the optimum value of parameters, the hardness changing depends on distance and micro structural examinations were performed.

The data taken form experiments were statistically analyzed by Taguchi method and also modeled using second order regression method.

Keywords: Laser engraving, Surface roughness, Engraving depth, Regression analysis

TEŞEKKÜR

Doktora deneysel çalışmalarım kapsamında bilgi ve tecrübeleriyle sağlamış olduğu yardımlar ve katkılar için sayın danışman hocam Yard. Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU'na teşekkür ederim.

Lazer oyma deneysel çalışmaları için lazer markalama tezgahı ve çalışma ortamı sağlayan Lazer Mikron Ltd. Şti Genel Müdürü sayın Birhan Ufku GÜZEL'e ve çalışanlarına teşekkür ederim. Mikroyapı ön çalışmaları için laboratuar temini sağlayan Dösan Isıl İşlem Ltd. Şti. yetkililerine teşekkür ederim.

Mikroyapı ön çalışmaları için laboratuar temini sağlayan Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden sayın Doç. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU'na ve Doç. Dr. Salim ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Doktora çalışmasına 08MÜH2007 nolu bilimsel araştırma projesi ile destek veren Ege Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

Doktora süresince gösterdikleri sabır ve desteklerinden dolayı anneme, babama ve kardeşlerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v

ABSTRACT vii

TEŞEKKÜR ix

ŞEKİLLER DİZİNİ xxi

ÇİZELGELER DİZİNİ xxxvii

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xliv

1.GİRİŞ 1

2.LAZER IŞININ ÜRETİLMESİ 14

2.1 Lazer Fiziği 14

2.2 Lazer Üretecinin Temel Elemanları 18

2.2.1 Aktif ortam 19

2.2.2 Uyarma mekanizması 19

2.2.3 Geri besleme mekanizması 19

2.2.4 Çıkış bağdaştırıcısı 20

2.3 Lazer Işığının Özellikleri 20

2.4 Endüstride Kullanılan Lazer Çeşitleri 21

2.4.1 Katı Hal Lazerleri 22

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.4.2 Gaz Lazerleri 22

2.4.3 Yarı iletken diyot lazerler 23

2.4.4 Boya lazerler 25

3. LAZER IŞININ METAL İLE ETKİLEŞİMİ 26

3.1 Lazer Işının Absorbsiyonu 26

3.2 Isıl Etkiler 29

4. LAZER OYMA 33

4.1 Temel İşlem Parametreleri 34

4.1.1 Lazer çıkış gücü 34

4.1.2 Lazer tarama hızı 34

4.1.3 Frekans 33

4.1.4 Tarama aralığı 34

4.1.5 Işın çakışma oranı 35

4.1.6 Işın tarama yönü 38

4.2 Lazer İşlem Parametrelerinin Lazer – Metal Etkileşimindeki Rolleri 39

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 41

5.1 Lazer Derin Oyma İşlem Parametrelerinin Seçimi 41

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5.2 Lazer Derin Oyma İşlem Performansı 43

5.3 Malzeme ve Metot 43

5.3.1 Deneylerde kullanılan malzemeler 43

5.3.2 Lazerle işleme (tarama) metodu 44

5.3.3 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 45

5.3.4 Oyma derinliği ölçümleri 46

5.3.5 Sertlik ölçümleri 46

5.3.6 Elektron mikroskobisi 48

5.3.7 Optik mikroskobi incelemeleri 50

5.3.8 XRD analizi 51

6. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ 52

6.1 AISI H13 Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının Analizi 53

6.1.1 AISI H13 takım çeliği için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 53

6.1.2 AISI H13 takım çeliği için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine etkisi 56

6.1.3 AISI H13 takım çeliği için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 59

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.1.4 AISI H13 takım çeliği için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine 63

6.2 AISI 316 Paslanmaz Çelik İçin Deney Sonuçlarının Analizi 66

6.2.1 AISI 316 paslanmaz çelik için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 66

6.2.2 AISI 316 paslanmaz çelik için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine etkisi 70

6.2.3 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 74

6.2.4 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine etkisi 77

6.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının Analizi 79

6.3.1 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 80

6.3.2 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine etkisi 84

6.3.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 87

6.3.4 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine etkisi 90

6.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının Analizi 94

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.4.1 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 94

6.4.2 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine etkisi 97

6.4.3 Tungsten Karbür için yüzey işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 100

6.4.4 Tungsten Karbür için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine etkisi 103

6.5 En Küçük Yüzey Pürüzlülüğü Ve En Büyük Oyma Derinliği İçin Parametrelerin Optimum Değerleri 107

6.5.1 AISI H13 takım çeliği için yüzey analizi 107

6.5.2 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey analizi 109

6.5.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey analizi 111

6.5.4 Tungsten Karbür için yüzey analizi 112

6.6 En Küçük Yüzey Pürüzlülüğü Ve En Büyük Oyma Derinliği İçin Mikroyapı ve Sertlik Analizi 115

6.6.1 AISI H13 takım çeliği için optimum değerlerin mikroyapıdaki değişimlere etkisi.....116

6.6.1 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi 116

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.6.2 AISI H13 takım çeliği için optimum değerlerin sertlikteki değişimlere etkisi.....123

6.6.3 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi 127

6.6.4 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin seçilen değerlerinin sertlikteki değişimlere etkisi.....131

6.6.5 AA 7075 alüminyum alaşımı için optimum değerlerin mikroyapıdaki değişimlere etkisi 134

6.6.6 AA 7075 alüminyum alaşımı için optimum değerlerin sertlikteki değişimlere etkisi.....138

6.6.7 Tungsten Karbür için optimum değerlerin mikroyapıdaki değişimlere etkisi….....142

6.6.8 Tungsten Karbür için optimum değerlerin sertlikteki değişimlere etkisi 145

7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ 150

7.1 AISI H13 Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi 153

7.1.1 AISI H13 takım çeliği için temel parametrelere ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi.....154

7.1.2 AISI H13 takım çeliği için temel parametrelere ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 156

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.1.3 AISI H13 takım çeliği için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 157

7.1.4 AISI H13 takım çeliği için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 160

7.2 AISI 316 Paslanmaz Çelik İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi 162

7.2.1 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelere ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 162

7.2.2 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelere ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 164

7.2.3 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 166

7.2.4 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 168

7.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi 170

7.3.1 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel parametrelere ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 170

7.3.2 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel parametrelere ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 172

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

7.3.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi.....174

7.3.4 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 176

7.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi 178

7.4.1 Tungsten Karbür için temel parametrelere ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 178

7.4.2 Tungsten Karbür için temel parametrelere ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 179

7.4.3 Tungsten Karbür için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi 181

7.4.4 Tungsten Karbür için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi 183

8. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ.....185

8.1 AISI H13 Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi 187

8.2 AISI 316 Paslanmaz Çelik İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi 190

8.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi 193

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

8.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi 196

9. TARTIŞMA 199

10. SONUÇ 206

11. ÖNERİLER 210

KAYNAKLAR 211

ÖZGEÇMİŞ 218

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil — Sayfa

2.1. Atom yapısı 14

2.2 Kendiliğinden ve uyarılmış emisyon 16

2.3 Kendiliğinden ve uyarılmış emisyon ile foton üretimi 17

2.4 CO_2 lazerinin üretim aşamaları 21

2.5 p ve n eklem bölgesi 23

2.6 Yarı iletken diyot parçaları 24

3.1 Lazer ışının metalle etkileşimi 26

3.2 Lazer ışını - metal etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar 28

3.3 Lazerle metal yüzey uygulamaları için proses haritası 29

3.4 Lazerle metal yüzey uygulamaları için sıcaklık – zaman ilişkisi 30

3.5 Lazer ışını – metal etkileşiminde ergime derinliğindeki değişim 31

3.6 Lazer ışını – metal etkileşiminde ergime derinliğinin süre ve güçle birlikte değişimi 32

3.7 Lazer – metal etkileşimi sırasında metal kaldırma prosesinde ergimiş metalin uzaklaştırılması ve buharlaşma olayı 32

4.1 Lazerle buharlaşma olayı 33

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

4.2 Lazer ışınının metal malzemede meydana getirdiği oyuk içi katılaşma durumu 34

4.3 Lazer ışının işleme yönü ve tarama aralığı 35

4.4 Işın çakışma durumu 36

4.5 Atım çakışma 37

4.6 Frekans ve hızın fonksiyonu olarak atım çakışma oranı 37

4.7 Işın çakışma durumları 37

4.8 Işın çakışma oranları 38

4.9 Işın tarama yön örnekleri 39

5.1 Lazer derin oyma işleminde kullanılan lazer markalama cihazı 44

5.2 Lazer derin oyma işleminde kullanılan tarama yönleri 45

5.3 Yüzey pürüzlülük profili ve elmas ucun hareket yönü 45

5.4 Vickers sertlik ölçümlerinde kullanılan uç geometrisi 47

5.5 Vickers sertlik ölçüm cihazı 47

5.6 Elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim 49

5.7 SEM analiz cihazı 50

5.8 Optik mikroskop cihazı 50

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

5.9 XDR cihazı 51

6.1 AISI H13 takım çeliği için gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 53

6.2 AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 54

6.3 AISI H13 takım çeliği için tarama hızın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 55

6.4 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 55

6.5 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi 56

6.6 AISI H13 takım çeliği için gücün oyma derinliğine etkisi 57

6.7 AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine etkisi 57

6.8 AISI H13 takım çeliği için tarama hızın oyma derinliğine etkisi 58

6.9 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 58

6.10 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi 59

6.11 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 60

6.12 AISI H13 takım çeliği için tarama hızın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 61

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.13 AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 61

6.14 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 62

6.15 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün tespitine yönelik işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi 62

6.16 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisi 63

6.17 AISI H13 takım çeliği için tarama hızının oyma derinliğine etkisi 64

6.18 AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine etkisi 64

6.19 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 65

6.20 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerin grafiksel gösterimi 65

6.21 AISI 316 paslanmaz çelik için gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 67

6.22 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 68

6.23 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 68

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.24 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 69

6.25 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi 69

6.26 AISI 316 paslanmaz çelik için gücün oyma derinliğine etkisi 70

6.27 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine etkisi 71

6.28 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızın oyma derinliğine etkisi 72

6.29 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 72

6.30 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelerin oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi 73

6.31 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 74

6.32 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 74

6.33 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 75

6.34 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 75

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.35 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi....76

6.36 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisi....77

6.37 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızın oyma derinliğine etkisi....77

6.38 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine etkisi....78

6.39 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi....79

6.40 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi....79

6.41 AA 7075 alüminyum alaşımı için gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisi....80

6.42 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi....81

6.43 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi....82

6.44 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi....83

6.45 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi....83

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.46 AA 7075 alüminyum alaşımı için gücün oyma derinliğine etkisi 84

6.47 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın oyma derinliğine etkisi 85

6.48 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine etkisi 86

6.49 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 86

6.50 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi 87

6.51 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi 88

6.52 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 88

6.53 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi 89

6.54 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 89

6.55 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi.....90

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.56 A 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisi 91

6.57 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine etkisi 92

6.58 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın derinliğine etkisi.....92

6.59 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 93

6.60 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi.....93

6.61 Tungsten Karbür için gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....94

6.62 Tungsten Karbür için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....95

6.63 Tungsten Karbür için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....96

6.64 Tungsten Karbür için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 96

6.65 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi 97

6.66 Tungsten Karbür için gücün oyma derinliğine etkisi 98

6.67 Tungsten Karbür için tarama hızının oyma derinliğine etkisi 98

6.68 Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine etkisi 99

6.69 Tungsten Karbür için tarama aralığının oyma derinliğine etkisi 99

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.70 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi 100

6.71 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğünü etkisi 101

6.72 Tungsten Karbür için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 101

6.73 Tungsten Karbür için frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....102

6.74 Tungsten Karbür için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisi 103

6.75 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi.....103

6.76 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisi 104

6.77 Tungsten Karbür için tarama hızının oyma derinliğine etkisi 105

6.78 Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine etkisi 105

6.79 Tungsten Karbür için tarama aralığını oyma derinliğine etkisi 106

6.80 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi 106

6.81 Farklı frekansta AISI H13 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yapılan yüzey analizi……..….108

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.82 Farklı frekansta AISI H13 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yapılan yüzey analizi…….……...108

6.83 Farklı frekansta AISI 316 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yapılan yüzey analizi ……110

6.84 Farklı frekansta AISI 316 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yapılan yüzey analizi..……..…….110

6.85 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız yapılan yüzey analizi……..…….112

6.86 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız yapılan yüzey analizi……..…….112

6.87 Farklı frekansta Tungsten Karbür için 30W etkin güç ve 200mm/s hız yapılan yüzey analizi 113

6.88 Farklı frekansta Tungsten Karbür için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yapılan yüzey analizi …….....113

6.89 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıda meydana getirdiği değişimlere etkisi 118

6.90 AISI H13 takım çeliği için SEM inceleme görüntüleri.....119

6.91 AISI H13 takım çeliği için boşluk görüntüleri.....120

6.92 AISI H13 takım çeliğinde beyaz bölge için çizgisel analiz 121

6.93 AISI H13 takım çeliği için nokta analizi 121

6.94 AISI H13 takım çeliği için çizgisel analiz 122

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.95 AISI H13 takım çeliği için çizgisel analiz sonucu 122

6.96 AISI H13 takım çeliği için XRD analiz sonuçları 123

6.97 AISI H13 takım çeliği için sertlik ölçüm örneği görüntüsü 124

6.98 AISI H13 takım çeliği için %60 güçte sertlik değişimi 125

6.99 AISI H13 takım çeliği için %100 güçte sertlik değişimi 126

6.100 AISI H13 takım çeliği için 20kHz'deki frekansta sertlik değişimi.....126

6.101 AISI H13 takım çeliği için 40kHz'deki frekansta sertlik değişimi 126

6.102 AISI 316 paslanmaz çeliği için parametrelerin optimum değerlerinin mikroyapıda meydana getirdiği değişimlere etkisi 128

6.103 AISI 316 paslanmaz çeliği için oyulmuş yüzeyde yeniden katılaşmış tabaka 127

6.104 AISI 316 paslanmaz çeliği için oyulmuş yüzeyde yeniden katılaşmış tabakanın ana metalle birleşme durumu 129

6.105 AISI 316 paslanmaz çelik için SEM analiz görüntüleri 129

6.106 AISI 316 paslanmaz çelik için XRD analiz sonuçları 130

6.107 AISI 316 paslanmaz çelik için sertlik ölçüm örneği görüntüsü 131

6.108 AISI 316 paslanmaz çelik için 18W güçte sertlik değişimi 132

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.109 AISI 316 paslanmaz çelik için 30W güçte sertlik değişimi 133

6.110 AISI 316 paslanmaz çelik için 20kHz'deki frekansta sertlik değişimi.....133

6.111 AISI 316 paslanmaz çelik için 40kHz'deki frekansta sertlik değişimi 133

6.112 AA 7075 alüminyum alaşımı için parametrelerin optimum değerlerinin mikroyapıda meydana getirdiği değişimlere etkisi 135

6.113 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabaka görüntüleri.....136

6.114 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabakadaki çatlaklar ve çatlak yönelimleri 136

6.115 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabakadaki süreksizlikler 137

6.116 AA 7075 alüminyum alaşımı için XRD analiz sonuçları 138

6.117 AA 7075 alüminyum alaşımı için sertlik ölçüm örneği görüntüsü 139

6.118 AA 7075 alüminyum alaşımı için 18W güçte sertlik değişimi 140

6.119 AA 7075 alüminyum alaşımı için 30W güçte sertlik değişimi 140

6.120 AA 7075 alüminyum alaşımı için 20kHz'deki frekansta sertlik değişimi 141

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

6.121 AA 7075 alüminyum alaşımı için 40kHz'deki frekansta sertlik değişimi 141

6.122 Tungsten Karbür için SEM analiz görüntüleri 143

6.123 Tungsten Karbür için oyuk içi yeniden katılaşmış tabaka.....144

6.124 Tungsten Karbür için yeniden katılaşmış tabaka ve bu tabaka dışında kalan bölge için EDS analizi ve sonucu 144

6.125 Tungsten Karbür için sertlik ölçüm örneği görüntüsü 145

6.126 Tungsten Karbür için 18W güçte sertlik değişimi 146

6.127 Tungsten Karbür için 30W güçte sertlik değişimi 147

6.128 Tungsten Karbür için 20kHz'deki frekansta sertlik değişimi.....148

6.129 Tungsten Karbür için 40kHz'deki frekansta sertlik değişimi.....148

6.130 Tungsten Karbür için sertlik ölçümü yapılan bölgeye ait mikroyapı görüntüleri.....149

7.1 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 155

7.2 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranın grafiksel gösterimi 157

7.3 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 159

7.4 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 161

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

7.5 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 163

7.6 AISI 316 paslanmaz çelik için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranın grafiksel gösterimi 165

7.7 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 167

7.8 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 169

7.9 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 171

7.10 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranın grafiksel gösterimi 173

7.11 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 175

7.12 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 177

7.13 Tungsten Karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 179

7.14 Tungsten Karbür için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranın grafiksel gösterimi 181

7.15 Tungsten Karbür için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 182

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil Sayfa

7.16 Tungsten Karbür için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi 184

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge Sayfa

5.1 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için lazer derin oyma işlem parametreleri 42

5.2 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için yüzey işlem parametreleri 42

5.3 Tungsten Karbür için lazer derin oyma işlem parametreleri 42

5.4 Tungsten Karbür için yüzey işlem yönü parametreleri 42

5.5 AISI H13 Takım çeliğinin kimyasal analiz sonucu 43

5.6 AISI 316 Paslanmaz çeliğinin kimyasal analiz sonucu 43

5.7 AA 7075 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonucu 43

5.8 Tungsten Karbür'ün kimyasal sonucu 43

6.1 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen değerleri 107

6.2 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen değerleri 107

6.3 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için mikroyapı ve sertlik deney düzeni 115

6.4 Tungsten Karbür için mikroyapı ve sertlik deney düzeni 116

6.5 AISI H13 için EDS ile çizgi analizinin sonucu 121

6.6 AISI H13 için EDS ile nokta analizinin sonucu 122

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge Sayfa

6.7 AISI H13 takım çeliği için sertlik ölçüm sonuçları 124

6.8 AISI 316 paslanmaz çelik için sertlik ölçüm sonuçları 131

6.9 AA 7075 alüminyum alaşımı için sertlik ölçüm sonuçları 139

6.10 Tungsten Karbür için sertlik ölçüm sonuçları 146

7.1 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri 152

7.2 Tungsten Karbür için lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri 153

7.3 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için yüzey işlem yönünün etkisinin tespitine yönelik lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri 153

7.4 Tungsten Karbür için yüzey işlem yönünün etkisinin tespitine yönelik lazer işlem parametreleri ve değerleri.....153

7.5 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 154

7.6 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 155

7.7 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 156

7.8 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 157

7.9 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 158

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge Sayfa

7.10 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 159

7.11 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 160

7.12 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 161

7.13 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 162

7.14 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 163

7.15 AISI 316 paslanmaz çelik için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 164

7.16 AISI 316 paslanmaz çelik için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları.....165

7.17 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 166

7.18 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 167

7.19 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 168

7.20 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 169

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge Sayfa

7.21 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 170

7.22 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 171

7.23 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 172

7.24 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 173

7.25 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 174

7.26 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 175

7.27 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 176

7.28 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 177

7.29 Tungsten Karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 178

7.30 Tungsten Karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 179

7.31 Tungsten Karbür için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 180

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge Sayfa

7.32 Tungsten Karbür için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 181

7.33 Tungsten Karbür için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları 181

7.34 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları 182

7.35 Tungsten Karbür için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları 183

7.36 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları 184

8.1 AISI H13 takım çeliğine ait yüze pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları 188

8.2 AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamada elde edilen sonuçlar 189

8.3 AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları 190

8.4 AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları 191

8.5 AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamada elde edilen sonuçlar 192

8.6 AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları 192

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam)

Çizelge Sayfa

8.7 AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları 194

8.8 AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamada elde edilen sonuçlar 195

8.9 AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları 195

8.10 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları 196

8.11 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamada elde edilen sonuçlar 198

8.12 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları 198

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
h	Plank sabiti
v	Yayılan dalganın frekansı
E_1	Düşük enerji seviyesi (elektronun kararlı olduğu seviye)
E_2	Yüksek enerji seviyesi (Uyarılmış seviye)
N_1	1. seviyedeki atom yoğunluğu
N_2	2. seviyedeki enerji yoğunluğu
k	Boltzman sabiti
T	Sıcaklık
A_b	Metalin yutma oranı
R	Metalin yansıtma oranı
O_p	Atım çakışma oranı,
O_s	Aralık çakışma oranı,
L	Yan yana iki ışın arasındaki mesafe (µm)
t	İki tarama yönü arasındaki mesafe (mm)
A	Alan (mm^2)
d	Işın çapı (mm)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

Simgeler	Açıklama
H	Tarama hızı (mm/s)
F	Frekans (kHz)
s	İki tarama yönü arasında alt alta gelen ışınların çakışma mesafesi
x	Işın tarama yönünde ard ard iki ışının çakışma mesafesi,
t_t	Etkileşim süresi (s)
P	Lazer çıkış gücü (W)
P_d	Odak alanındaki güç yoğunluğu, (W/mm^2)
E_p	Darbe enerjisi (J)
TA	Tarama aralığı (mm)
Y	Yön (°)
G	Güç (W)
R	Performans karakteristiği (Yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği)
n	Deney sayısı
S/N	Sinyal gürültü oranı
SS_A	A. Parametrenin kareleri toplamı
SS_m	Ortalamanın kareleri toplamı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

Simgeler	Açıklama
SS_T	Toplam karelerin toplamı
SS_E	Hatanın kareleri toplamı
N	Parametrenin düzey sayısı
ηi	*i.* Deneyin Ra yada D için hesaplanan S/N değeri
η_{Ai}	A. Parametrenin i. düzeyindeki S/N oranı
f_A,	A. Parametrenin serbestlik derecesi
P	Katkı yüzdesi
F_{AO}	A. Parametrenin (H, G, F, T.A.) F-test değeri
YP	Yüzey Pürüzlülüğü
D	Derinlik

1. Giriş

Mikro boyuttaki kalıpların, karmaşık geometrideki şekillerin ve yüksek sertliğe sahip işlenmesi zor metallerin geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi zordur. Bunun yanı sıra seri imalatta da süre ve maliyet yönünden sıkıntılar yaratmaktadır. Özellikle mikro ölçülerdeki kalıp ve/veya kalıp parçaları biyomedikal, elektronik ve bilgisayar endüstrisindeki parçaların üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kalıplardaki küçük ölçülerdeki yada dar toleranslardaki detaylar için hassas işleme yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir. Lazer oyma bu konuda hassas ölçü toleransları ve işlem görmüş yüzeyde sağladığı iyi yüzey kalitesi ile geleneksel yöntemlere alternatif bir yöntemdir. İmalatı yapılacak parçaların geometrisinin tasarımında da esneklik sağlaması bu yöntemin en önemli avantajlarındandır. Lazer işleme sistemlerinin hepsinde kesici takım olarak bir lazer ışınının kullanılması takım kaynaklı hataları (aşınma, gerilme, mikro çatlaklar) elimine etmektedir. Tüm bu avantajları ile lazer oyma yöntemi mikro boyuttaki parçaların ve kalıpların imalatında alternatif ve gelişmeye açık bir yöntem olarak görülmektedir.

Lazer üretiminin kolaylaşması ve yaygınlaşması bu sistemlerin mühendislik uygulamalarında kullanılması yönünde yeni araştırmaların yapılmasına ve sisteme ait öngörülerin ortaya konulmasına sebep olmuştur. Lazer sistemleri için işlenecek metal malzeme çeşidinde ve sertliğinde sınırlandırılma olmaması bu sistemlerin uygulama alanlarını genişletmekte ve uygulamalar için esnek üretim çeşitliliği sağlamaktadır. Bu avantajları ile lazer yardımıyla yapılan işleme yöntemleri her ölçüdeki ve sertlikteki malzeme için istenen geometride ve tolerans aralığında üretim kolaylığı sağlamaktadır.

Lazer yardımıyla yapılan işleme tekniklerinin hepsi temelde aynı çalışma sistemine sahiptir. Yüksek yoğunlukta ve iş parçası yüzeyine odaklanmış bir lazer ışını, hedef geometrinin yüzeyine gönderilir. Lazer ışının iş parçasıyla teması sonucunda bölgesel ve çok hızlı gelişen bir termal reaksiyon başlar ve sonuçta tabakalar halinde metal işlem görmüş yüzeyden buharlaştırılarak uzaklaştırılır. Işının işlenecek yüzeyi taraması sonrasında kaldırılan malzeme miktarı mikron seviyelerinde olduğu için oyma işlemi belirli bir tekrar sayısından sonra tamamlanır. Her seferinde kaldırılan malzeme miktarı iş parçasının malzeme özelliklerine bağlı olarak belirlenen parametrelere göre değişmektedir. İşlem görmüş metalde hiç ya da çok az ısıl hasarlar söz konusudur. Çünkü ısı bölgeseldir ve çalışma bölgesinde en yoğun seviyededir.

Literatür çalışmaları sonucunda farklı malzemelere uygulanacak lazer oyma işlemi için uygun parametrelerin seçimi konusunda çok az sayıda çalışma olduğu görülmüş, bunun yanında işlenmiş yüzeyin mikroyapısal değişimi ile ilgili olarak örnek çalışmalara rastlanmamıştır. Araştırmalarda, mikroyapı ve sertlik incelemelerine yönelik çalışmaların sadece lazerle yapılan ısıl işlem, kesme ve kaynak gibi işlemler sonrasında yapılmış olduğu görülmüştür. Lazerle yapılan ısıl işlemler oymaya yönelik değildir ve kullanılan lazer sistemi de oyma kabiliyeti düşük sistemlerdir. Bu çalışmalarda yüzeye lazerle tek yada iki katman taranarak incelemeler yapılmıştır. Bununla birlikte, literatürde çoklu tarama ile gerçekleştirilen derin oyma işlemleri sonrasında mikroyapısal incelemelerine rastlanmamıştır.

Lazerin endüstriyel uygulamaları genel olarak kesme ve kaynak işlemleri üzerinedir ve bu işlemler ısıl işlemden tamamen farklı uygulamalar olduğu için her yöntemde kullanılan lazer sistemleri de amaca göre farklılık göstermektedir. Uygulama çeşidinin farklı olması ve farklı lazer çeşidinin kullanılması, yönteme ait proses parametrelerinde farklılık göstermektedir. Bu sebepten, lazerin endüstriyel uygulamaları için her bir parametrenin herhangi bir değeri için net sonuçlar ortaya koymak zordur, ancak genel bir yaklaşımda bulunulabilmektedir.

Bu çalışmada, kullanılan lazer çeşidi endüstride markalamaya yönelik uygulamalarda kullanılan Fiber Lazerdir. Fiber lazerler, halen yoğun bir şekilde kullanılmakta olan CO_2 ve Nd:YAG malzeme işleme lazerlerine etkin bir alternatif oluşturmaktadır. Dalga boyu aralığı, güvenirlik, yoğunluk, verim ve benzersiz performans parametreleri nedeniyle lazer teknolojilerinde geniş bir alanda uygulanabilir ve kullanılabilir olmaya adaydır (www.latarum.kocaeli.edu.tr).

Bu çalışmada kullanılan lazer sisteminin farklılığından dolayı temel parametreler (güç, ışın çapı, tarama hızı, frekans) farklılık göstermektedir. Özellikle fiber lazer kullanılarak yapılan uygulamalar arasında derin oymaya yönelik akademik çalışma yok denecek kadar azdır hatta derin oyma sonrası mikroyapısal araştırmalar hiç yapılmamıştır ve literatürde bu alanda çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın temeli lazer derin oyma işlemi için en iyi yüzeyin ve en yüksek oyma derinliğinin elde edileceği optimum parametrelerin tespit edilmesi ve bu optimal parametrelerin sertlikte meydana getireceği değişimlerin araştırılması işlemleri üzerine kurulmuştur.

Endüstride kullanılan metal işleme uygulamalarında prosese etki eden faktörlerin çok sayıda olması durumunda optimum sonuçlara ulaşmada beklenen cevapların alınabilmesi kapsamlı ve detaylı deneysel çalışmaların yapılmasını gerektirmektedir. Her bir parametrenin çıktı üzerindeki etkilerinin tespitine yönelik yapılacak detaylı deneysel çalışmalar hem zaman hem de maliyet kayıplarına yol açmaktadır. Bu açıdan üretimden beklenen çıktıların elde edilmesine yönelik uygulamalar için istatistiksel deney tasarımı yöntemleri deneysel çalışmalardaki maliyet ve zaman kayıplarını minimuma indirmektedir. Deney tasarımı yöntemiyle proses performansına etki eden faktörlerin ve düzeylerinin belirlenmesine yönelik ilk istatistiksel çalışmalar 1920'lerde istatistikçi R.A. Fisher tarafından tarımsal uygulamalar için gerçekleştirilmiştir. İmalat endüstrisindeki uygulamaları 1980'lerde G.Taguchi tarafından başlatılmış ve üretimde sağladığı olumlu sonuçlar bu yöntemin uygulama alanını genişletmiştir. Akkurt'a (2002) göre deney tasarımı, bir ürün veya prosesi etkileyen değişken parametrelerden kritik olanları ve bunların hedef değerlerini tayin eden bir yöntemdir. Bir ürünün kalitesi sadece üretim aşamasında değil ürünün tasarım aşamasını da kapsamaktadır. Dolayısıyla nihai ürünün üretim ve tasarım aşamasını bir süreç olarak kabul edip süreci değerlendirmek ve tasarlamak gerekmektedir. Taguchi metodu, parametrelerin ürünü ne ölçüde etkilediğinin tespitine yönelik araçları sunmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için ürün ve proses tasarımını gerçekleştirerek prosesteki varyasyonu en aza indirmeye yönelik araçları sunmaktadır. Endüstride metal işleme uygulamalarında Taguchi metodu en güvenilir sonuçları vermesi sebebiyle tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, klasik yöntemlerle talaşlı işlenmesi zor/problemli malzemelerin fiber lazer kullanılarak derin oyulması ve sonuçta işlem görmüş yüzeyin yüzey pürüzlülüğünü, oyma derinliğini ve oyulan yüzeyin alt tabakasında meydana gelen sertlik değişimlerini incelemektir. Çalışmanın temel çıktıları, yüzey pürüzlülüğü, oyma derinliği ve sertlik dağılımıdır. Bu kapsamda, lazerle metal yüzeyinde yapılan oyma yada gravür gibi çok katmanlı yüzey işlemlerinde işlem parametrelerinin çıktı üzerindeki etkileri ile ilgili genel bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu uygulamalar için deneysel çalışmalar yapılmıştır ve proses çıktıları için matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar sonunda özellikle kalıp işleme ve makine imalat endüstrisinde, karmaşık geometrilere sahip iş parçalarının lazerle derin oyulması sonrasında meydana gelebilecek yüzey

pürüzlülüğü, oyma derinliği ve sertlik değişimlerinin öngörülmesi amaçlanmaktadır.

Bu yönüyle çalışma teknoloji, yöntem ve uygulanabilirlik açısından yenilikler içermekte olup deneysel çalışma sonuçlarıyla alanla ilgili varsa mevcut eksikliklerin giderilmesi ve bu sayede literatüre ve endüstriye bilgi birikimi sağlanması hedeflenmiştir.

1.1 Literatür Araştırması

Literatürde lazerin endüstriyel uygulamalarda kullanıldığı işleme alanları sıklıkla kaynak, yüzey sertleştirme ve kesme gibi uygulamalar üzerine olduğu tespit edilmiştir. Bu kapsamda değerlendirilen literatür incelemesi lazer yüzey sertleştirme, lazer kesme, lazer kaynak ve lazerle oyma/işleme başlıklarıyla sınırlandırılmıştır.

1.1.1 Lazer yüzey sertleştirme

Yüzey sertleştirme uygulamaları için sürekli moddaki (CW) lazer sistemler kullanılmaktadır. Literatürde genellikle çelik malzemeler için yüzey sertleştirme uygulamalarının yapıldığı tespit edilmiştir. Çalışmalarda sertleşme derinliği ve genişliği, mesafeye bağlı sertlik ve mikroyapısal değişimler araştırılmıştır. Aşağıda bu alanda yapılmış çalışmalara ait literatür örnekleri verilmiştir.

Selvan and Subramanian (1999), otomobillerde kullanılan millerin, dönüş kumanda levyesi bağlantı çubuklarının, eksantrik millerinin imalatında kullanılan EN18 çeliğinin sürekli moda çalışan bir CO_2 lazeri ile sertleştirilebilirliğini ve sertleşen yüzeyin aşınma davranışını araştırmışlardır. Sertlik değerinin 3 kat arttığını bununla birlikte artan lazer gücüyle birlikte sertleşme derinliğinin arttığını ve sertleşen yüzeyin aşınmaya dayanıklı olduğunu tespit etmişlerdir.

Colaço and Vilar (1999), DIN X42Cr13 takım çeliğin lazerle yüzeyinin ergitilmesi sonucu yüzeyde meydana gelen faz dönüşümleri ile ilgili araştırmalar yapmışlardır. Bu işlemler için sürekli modda çalışan bir CO_2 lazeri kullanmışlardır. Sertleştirme işlemi sırasında östenitin martenzite dönüştüğünün karbürün östenit ve martenzit içinde çökeldiğini tespit etmişlerdir.

Katsamas and Haidemenopoulos (1999), 15CrNi6 düşük alaşımlı çeliğe 3kW sürekli modda çalışan bir CO_2 lazeri kullanılarak sertleştirme işlemi uygulamışlar sonrasında da sertlik ve mikroyapı analizleri yapmışlardır. Sertleştirme işlemi sonrasındaki sertlik değerinde işlem öncesindeki sertlik değerine göre 2,5 katı kadar bir atış elde etmişler. Isının etkisi altındaki bölgede ve geçiş bölgesinde mikroyapıda değişimler gözlemlenmiş ve başlangıçtaki beynitik yapının temperlenmiş geçiş bölgesinde ince M_7C_3 tanelerinin dağılmasıyla ikincil sertleşme etkisi tespit etmişlerdir. Bununla birlikte ısının etkisi altındaki bölgenin derinliğinin lazerin gücüne, tarama hızına ve ışın çapına bağlı olduğunu vurgulamışlardır. Sertleştirme öncesinde yüzeyin grafitle kaplanması enerji emilimini arttırdığını ve bununla birlikte ısının etkisi altındaki bölgenin derinliğinin artacağını tespit etmişlerdir.

Pashby et al. (2003), iki farklı çelik 080M40 and 817M40 için 1.2kW diyot laser ile argon gazı altında sertleştirme işlemi yapılmıştır. Lazerin gücünün ve işlem hızının bir fonksiyonu olarak sertlik dağılımını incelemişlerdir. Düşük güçte ve hızda sertleşme elde etmişler.

Grum and Kek (2004), yüzeyleri kaplanmış C45E çelik numuneleri CO_2 kullanılarak dönüşüm sertleştirme işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlem sırasında yüzeydeki kaplamada herhangi bir ergitme işlemi gerçekleşmemiştir. Kaplama kalınlığının enerji emilimini ve dolayısıyla sertleşme derinliğini ve genişliğini etkilediğini tespit etmişlerdir.

Chiang and Chen (2005), H13 takım çeliğinde lazerle yüzey sertleştirmenin etkilerini tespit etmeye çalışmışlardır. Bu işlemler için 2kW sürekli modda çalışan bir CO_2 lazeri kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar sonrasında ergimiş tabakada çok ince lamellerle çevrelenmiş dendritik yapı ve sertleşen tabakada ise tane sınırlarında çökelmiş karbür içinde martenzitik bir yapı elde etmişlerdir. Isıdan etkilenmiş bölgede ise karbür tanecikleri irileşmiş ve çoğunun da temperlenmiş olduğunu tespit etmişlerdir. Ergime işlemi sırasında, artan enerji ile birlikte sertleşen bölgedeki kritik faz dönüşüm sıcaklığının düştüğünü tespit etmişlerdir.

Liu et al. (2007), otomobil motor silindirlerinde kullanılan gri dökme demirin CO_2 ve Nd: YAG lazerleri kullanılarak sertleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Lazer yüzey sertleştirmede lazer işlem parametrelerin ve lazer çeşidinin sertleşen tabakanın kalınlığında ve genişliğinde önemli bir etkiye sahip olduğunu bununla birlikte işlem hızının artmasıyla sertleşme derinliğinin

azaldığını tespit etmişlerdir. CO_2 lazerle elde edilen sertleşme derinliği ve genişliğinin Nd: YAG lazere göre daha fazla olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Basu et al. (2007), SAE 52100 beynitik çeliğinin lazer yüzey sertleştirme işlemiyle sertliğini arttırmak ve aşınma davranışını tespit etmek için 9kW sürekli modda çalışan bir CO_2 lazeri kullanmışlardır. İşlemler sonunda sertliği yüksek ve aşınmaya dayanıklı baskın bir martenzitik yapı tespit etmişlerdir.

Shin et al. (2007), S45C çeliğinin sürekli moda çalışan 2,8kW'lık Nd: YAG lazer kullanarak sertleştirilebilirliğini araştırmışlardır. Optimum sertleştirme şartlarını ve işlem parametrelerinin yani, lazerin gücünün, odak mesafesinin ve koruyucu gazın sertleşme derinliğinde, sertleşme genişliğinde ve sertlik dağılımındaki etkisini tespit edebilmek için farklı deneysel koşullar oluşturmuşlardır. Üç farklı odak mesafesi ile yüzey sertleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, farklı odak mesafelerinde sertleşme derinliğinin ve genişliğinin değiştiğini tespit etmişlerdir.

Shin and Yoo (2008), sürekli modda çalışan 2,8kW'lık Nd: YAG lazer kullanılarak H13 takım çeliğinin sertleştirilebilirliğine etki eden parametreleri ve sertleştirme sonrasında sertlikteki değişimimin hızın bir fonksiyonu olarak araştırmışlardır.

1.1.2 Lazerle kesme

Lazer teknolojisinin gelişiminin son yıllarda hızlanması ile endüstriyel uygulamalarda da ivmelenme meydana getirmiştir. Bu ivmelenme en çok lazerle kesme alanında kendini göstermiştir ve neredeyse her malzeme grubu için kesme parametreleri ve koşulları tespit edilmiştir. Günümüzde 50mm kalınlığa kadar lazerle kesme işlemi yapılabilmektedir. Araştırmacılar, sürekli gelişme gösteren lazer kesme yöntemi ile ilgili olarak işlem koşullarının ve parametrelerinin, kesilen yüzey kalitesine ve mikroyapısal değişimlere olan etkisinin tespitine yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Aşağıda konuyla ilgili bazı literatür çalışmaları hakkında bilgiler verilmiştir.

Lei and Lijun (1999), Q-anahtarlamalı CO_2 atımlı lazerle yapılan kesme işleminde Si_3N_4 seramiklerine kesme parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Lazerle kesme işlemi sırasında ısı kaynaklı hataları azaltmak için atım süresinin kısaltılmasını ve en düşük sürenin en iyi sonucu vereceğini tespit etmişlerdir.

Bununla birlikte termal etkileri azaltmak için kesme hızının arttırılması ve çoklu atım yapılmasını önermektedirler.

M. Boutinguiza et al. (2002), CO_2 lazer kullanılarak kesme ile ilgili araştırma yapmışlar. Kesme hızının lazerin gücüne bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Kesme işleminde oksijen gazını da yardımcı gaz olarak kullanmışlardır. Diğer asal gazlara göre kesme hızına etkisinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir.

Kleine et al. (2002), stent implantların fiber lazer kullanılarak kesilmesi ile ilgili araştırma yapmışlar. İki atım arasındaki mesafenin azaltılması ile kesme kalitesinde artışın olacağını ve yardımcı gazlar kullanılarak iyi yüzey kalitesi elde edilebileceğini bulmuşlardır.

Kleine et al. (2003), fiber lazer ile kesme parametreleri ile ilgili araştırma yapmışlar. Lazer gücü arttıkça küçük parçaların kesme işleminde verim alınamayacağını ve atımlar arasındaki mesafenin düşürülmesiyle yüzey kalitesinde artış olacağını tespit etmişlerdir.

Shanjin and Yang (2006), 350W gücündeki Nd:YAG lazer kullanılarak titanyum alaşımlarının kesilmesi ve kesme parametrelerinin kesme yüzey kalitesine ve HAZ bölgesine etkilerini araştırmışlardır. Kesme hızının, yardımcı gazın çeşidinin ve basıncının, atım parametrelerinin HAZ bölgesinin kalınlığı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Golnabi and Bahar (2009), maksimum çıkış gücü 170W olan Nd: YAG lazer kesme sistemi ile iki farklı kalınlıktaki çelik malzeme için farklı gaz basıncı altında lazer çıkış gücünün kesme genişliğine, yüzey pürüzlülüğüne ve HAZ genişliğine etkisini araştırmışlardır.

Riveiro et al. (2010), AA 2024 alüminyum magnezyum alaşımını 3,5kW'lık CO_2 lazer ile kesme işleminde, proses parametrelerinin kesilen kenarın yüzey pürüzlülüğüne ve HAZ genişliğine etkisini deney tasarımı yöntemlerinden faktöryel metod kullanarak incelemişlerdir.

Eltawahni et al. (2010), 1,5 kW gücündeki CO_2 lazer ile polietilen malzemenin kesilmesi işlemini deney tasarımı yöntemini kullanarak

araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar için ikinci dereceden regresyon modeli oluşturmuşlardır.

1.1.3 Lazerle kaynak

Literatürde lazer kaynak konusunda yapılan çalışmalar CO_2, Nd:YAG vb. lazer çeşitleri kullanılarak Al alaşımları, farklı çelikler ve alaşımları, farklı kompozitler gibi malzemelerin kaynak edilebilirliği ile ilgili konu başlıklarında toplanmaktadır. Aşağıda lazer kaynak konusunda son dönemde gerçekleştirilen bazı çalışmalara örnekler verilmiştir;

Okon et al. (2002), AA 5083 alaşımının lazer kaynak modları ile ilgili araştırma yapmışlar. Lazer gücünün arttırılması ve odak çapının azaltılmasıyla nüfuziyetin artacağını bulmuşlardır.

Kleine et al. (2004), Fiber lazer kullanılarak iş parçalarının kaynağına, kaynak parametrelerinin etkisi ile ilgili araştırma yapmışlar. Fiber lazerin yüksek ışın kalitesi sebebiyle, mikro kaynaklar için küçük çaplı ışın elde edilebileceğini bulmuşlardır.

Zhu et al. (2005), AZ31 magnezyum alaşımlarının, 2 kW' lık CO_2 ve 1,5 kW'lık diyote lazeri kullanılarak, bu malzemelerin kaynağı sırasında kaynak kalitesine odak çapının etkisini araştırmışlardır. CO_2 lazeri için 150 mm/s ve diyot lazeri için 50 mm/s kaynak hızı tespit etmişler.

Niu et al. (2006), SiCw/6061 alüminyum katkılı alaşımın kaynak bölgesinin mukavemetine kaynak işlem parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Kaynak sırasında oluşan ergime sonucu kırılgan reaksiyon ürünlerinin Al alaşımı ile Si_W arasındaki ilk fazın zarar görmesine sebep olduğunu bu sebepten dolayı kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin zayıfladığını tespit etmişlerdir. Bu amaçla lazer kaynağı sırasında ergimiş metal havuzunun ısı girdisini azaltıp Si miktarının artırmanın metal ile katkı elementi arasındaki ara yüzey reaksiyonunun kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir.

Paola et al. (2007), A359/SiC_P metal matrisli kompozitlerin lazer kaynağında, proses parametrelerinin kaynağa etkilerini araştırmışlardır. CO_2 lazer kaynağının Al_4C_3'ün formuna etkisinin olduğunu tespit etmişler. Doğru seçilmiş proses parametreleriyle Al_4C_3 etkisinin azaltılabileceğini bulmuşlardır.

Berretta et al. (2007), Nd. YAG lazer kullanılarak AISI 304 ve AISI 420 çeliklerin kaynağı üzerine araştırma yapmışlar. Lazer ışınının kaynak yerindeki pozisyonunun kaynak karakteri üzerine etkisini araştırmışlardır.

Song et al. (2008), ikili TiNi alaşımından yapılmış tellerin, parametrelerin oluşturduğu farklı işlem koşulunda yapılan kaynak işleminin mikroyapıya etkisini araştırmışlardır. Proses parametreleri olarak atım genişliği ve akım seçilmiş ve her iki parametrenin de kaynak bölgesinin mekanik özelliklerine önemli etkilerinin olduğunu ve kaynak bölgesinde mikroyapısal dönüşümün çok az olduğunu tespit etmişlerdir.

Casalino and Ghorbel (2008), Nd. YAG lazer dolgu kaynağı kullanılarak kalıpların onarılması ile ilgili araştırma yapmışlar.

Mei et al. (2009), yüksek mukavemetli galvanizli çelikleri CO_2 lazer kullanarak kaynaklamışlar ve işlem parametrelerini optimize etmişlerdir. Bununla birlikte çekme testi ve kaynak bölgesinde sertlik ölçümleri ve mikroyapı analizleri yapmışlardır. Analizler ve ölçümler sonucunda akma ve çekme mukavemetinin işlem görmemiş olana göre daha yüksek olduğu ve yapıdaki Mn'ın ve Cr'un kaynak bölgesinde çekme mukavemetinin ve korozyona dayanıklılığının artmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Kaynak hızının yüksek oluşu ve hızlı yenidenkristalleşme sonrasında, HAZ bölgesinde yeni tanelerin oluştuğu bu bölgenin sertliğinin işlem görmemiş bölgenin sertliğine göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Akman et al. (2009), Ti6Al4V alaşımına lazer kaynak uygulaması yapmışlardır. Kaynak parametrelerinin (atım enerjisi, atım süresi) kaynak bölgesinin sertliğine, çekme mukavemetine ve HAZ bölgesine olan etkilerini araştırmışlardır. Sonuçta füzyon bölgesindeki sertlik değeri HAZ bölgesine ve ana metale göre daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte faz dönüşümü sebebiyle tane büyümesi sonucunda kaynak bölgesinin mukavemetinin azaldığını tespit etmişlerdir.

1.1.4 Lazerle yüzey işleme

Lazerle yüzey işleme teknolojisi gelişmekte olan yeni bir teknolojidir. Lazerin kesme konusundaki olumlu etkilerinin delme ve oyma gibi uygulamalarda da sağlanabileceği düşüncesiyle son yıllarda, araştırmacılar tarafından

değerlendirilmeye başlanmıştır. Çalışmalar genellikle Nd:YG lazerlerle gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmalarında, araştırmacıların daha çok proses parametrelerinin oyma derinliğine ve yüzey özelliklerine yönelik çalışmalar yaptıklarını göstermektedir. Yapılan araştırmalar, derin oymaya yönelik çalışmaların neredeyse olmadığını göstermiştir. Aşağıda, literatürdeki lazerle oyma uygulamalarını içeren örnek çalışmalar verilmiştir.

Slocombe and Li (2000), Q-anahtarlamalı 75 W gücündeki Nd: YAG lazer ile metal/polimer kompozit malzemelerin argon gazı atmosferinde işlenmesini araştırmışlardır. Artan işlem hızının işleme derinliğinde azalmaya sebep olduğunu ve Ar gazının yüzeyde yanmayı önlediğini tespit etmişlerdir.

Qi et al. (2003), Q-anahtarlamalı Nd: YAG lazer ile paslanmaz çelik yüzeyine markalama yapmış ve proses parametrelerinden frekans ve gücün, markalama derinliğine ve yüzey renk karşıtlığına etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar sonrasında, frekansın yüzey kalitesine (karşıtlığına) etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Artan frekansın gücün pik değerini düşürdüğünü ve bu sebepten buharlaştırma gücünü düşürdüğünü, dolayısıyla markalama derinliğinin de düştüğünü tespit etmişlerdir.

Kaldos et al. (2004), Nd: YAG lazer kullanılarak işlenmesi zor metaller ve seramiklerin işlenmesinde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkilerini faktöriyel analizle araştırmışlardır. Artan işlem hızının ve lazer gücünün yüzey pürüzlülüğünü ve oyma derinliğini düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Wendland et al. (2005), çelik ve alüminyum malzemelerin Q-anahtarlamalı Nd: YAG lazer kullanarak derin oyma işleminde işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisini araştırmışlardır. Lazer gücünün artmasıyla hem oyma derinliğinin hem yüzey pürüzlülüğünün arttığını bununla birlikte artan hızla birlikte ikisinin de azaldığını tespit etmişlerdir.

Campanelli et al. (2007), 30W'lık Nd:YVO_4 lazer kullanılarak alüminyum magnezyum alaşımı işlenmiş ve işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkileri faktöriyel analizle araştırmışlardır.

Leone et al. (2009), Nd: YAG lazer kullanılarak ahşapların lazerle oyulmasında işlem parametrelerinin oyma derinliğine etkisini araştırmışlardır.

Yüzeyin oyma sonrasında yanmasının doğru seçilmemiş parametrelere bağlı olduğuna, yüksek hızlarda oyma derinliğinin düştüğünü bu nedenle yüksek hızlarda tarama sayısının arttırılması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Melkote et al. (2009), 35W sürekli moda fiber lazer kullanılarak sertleştirilmiş takım çeliği işlenmiştir.

Yasa and Kruth (2010), maksimum çıkış gücü 100 W olan sürekli modda Nd: YAG lazer kullanarak AISI 1045 çeliğinin yüzeyinde işleme yapmışlardır ve bu işlemlerde proses parametrelerinden tarama yönünün, frekansın, gücün, tarama hızının ve tarama aralığının oyma performansına etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak tarama hızının ve gücün oyma derinliğinde ve yüzey pürüzlülüğünde önemli bir etkiye sahip olduğunu, frekansın çıktılar üzerinde doğrusal etki göstermediğini, hızla birlikte çakışma oranı dolayısıyla etkili olduğunu, ayrıca oyma derinliğinin tarama yönünden bağımsız olduğunu ancak yüzey pürüzlülüğünün tarama yönünden etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Leone et al. (2010), AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin yüzeyinde 20W Nd:YAG lazer kullanarak markalama çalışmaları yapmışlardır. İşlem parametrelerinin HAZ bölgesine, markalanmış yüzeyin görünürlüğü, yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini araştırmışlardır. Markalanmış yüzeyin netliğinin yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğunu ve düşük frekansta ve güçte daha iyi bir görüntü (netlik) elde edilebileceğini tespit etmişlerdir.

1.1.5 Deney tasarımı uygulamaları

Bir ürünün nihai kalitesi önceleri üretim aşamasıyla ilişkilendirilirdi ancak daha sonra kalitenin, üretim aşamasından önce tasarım aşamasında belirlenen koşullardan etkilendiği tespit edildi. 1950'lili yıllarda deney tasarımı yönteminin makine endüstrisine uygulanabilirliği belirlendikten sonra bu alanda kalite maliyetlerinin deney tasarımı yöntemlerinin kullanılmasıyla düşürülebileceği tespit edilmiştir. Makine endüstrisi için G. Taguchi ile başlayan çalışmalar sonucunda, üretim öncesinde uygun deney koşullarının doğru bir şekilde tespit edilmesi ile üretim maliyetlerinin azalacağı konusunda olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Son yıllarda büyük gelişmelerin sağlandığı deney tasarımı yöntemleri, neredeyse araştırmacıların kullandığı deneysel araçlardan biri olmuştur. Endüstrinin her alanında kullanılmaya başlanılan deney tasarım yöntemleri ile

literatürde binlerce çalışmaya rastlamak mümkündür. Aşağıda literatür çalışmalarından bazı örnekler verilmiştir.

Chen et al. (1996), L_{16} Taguchi ortogonal deney düzenini kullanarak bir deney düzeni oluşturup lazerle demir oksit kaplı cam yüzeyinde mikro oyma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Parametrelerin oyma genişliğine etkisini tespit etmeye çalışmışlardır.

Tosun et al. (2004), AISI 4140 çeliğinin tel erozyonla kesilmesi işleminde proses parametrelerinin (voltaj, atım süresi, tel ilerleme hızı, basınç) kaldırılan malzeme miktarına ve kesme genişliğine etkisini L_{18} Taguchi ortogonal deney düzeni kullanarak tespit etmeye çalışmışlardır.

Lim et al. (2006), SS41 metal plakanın lazerle kesme işleminde proses parametrelerinin (kesme hızı, güç, gaz basıncı, verimlilik) yüzey pürüzlülüğüne etkisini L_9 Taguchi ortogonal deney düzenini kullanarak araştırmışlardır. En düşük en iyi kalite karakteristiği ile minimum yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin en iyi değerlerini tespit etmeye çalışmışlardır.

Bağcı and Aykut (2006), kobalt katkılı bir alaşımın CNC'de işlenmesi ile ilgili işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için L_{27} Taguchi ortogonal deney düzenine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü için en küçük en iyi kalite karakteristiği kullanarak parametrelerin optimum değerlerini araştırmışlardır.

Almeida et al. (2006), tam faktöryel deney düzenini kullanarak Ti6Al4V metalinin lazerle kesilme işleminde kesme parametrelerinin (frekans, atım mesafesi ve enerji) kesilmiş bölgenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini tespit etmek amacıyla faktoriyel düzene göre deneyleri gerçekleştirip sonrasında ANOVA analizi ile parametrelerin istatistiksel olarak anlamlılığını araştırmışlardır.

Dubey and Yadava (2007), zirkonyum seramik plakaya Nd:YAG lazer kullanarak delme işlemi yapmışlardır. İşlem parametrelerin (akım, frekans, atım genişliği) minimum HAZ kalınlığı için optimum değerlerini Taguchi Metodunu kullanarak araştırmışlardır. L_{16} ortogonal deney düzenine göre yapılan deneyler sonrasında elde edilen sonuçlara regresyon analizi ile matematiksel modelleme yapmışlardır.

Nalbant et al. (2007), 1030 çeliğinin CNC'de işlenmesi ile ilgili işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek için L_9 Taguchi ortogonal deney düzenine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Minimum yüzey pürüzlülüğü için en küçük en iyi kalite karakteristiğini kullanmışlardır.

Campanelli et al. (2007), 30W ortalama çıkış gücündeki bir markalama sistemiyle alüminyum – magnezyum alaşımına oyma işlemi uygulamışlardır. Tam faktöriyel deney düzenini kullanarak bir deney düzeni oluşturmuşlar ve işlem parametrelerinin (frekans, hız ve işlem yönü) yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisini araştırmışlardır.

Dubey and Yadava (2008), alüminyum levhanın lazerle kesilme işleminde kesme parametrelerinin (gaz basıncı, atım genişliği, frekans ve kesme hızı) kesme kalitesine etkisini araştırmak amacıyla L_9 Taguchi ortogonal deney düzenine göre deneysel çalışmalar yapmışlardır.

Soveja et al. (2008), Ti6Al4V alaşımının yüzeyini lazerle 0° ve 90°'de 6 kez taramışlardır ve işlem sonrası yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Proses çıktısı olarak yüzey pürüzlülüğünü, oyma derinliğini ve oyma derinliğinin yüzey pürüzlüğüne oranını (conposite function) araştırmışlardır. Dört farklı parametrenin (frekans, tarama aralığı, hız ve enerji) proses çıktısına etkisini L_{16} Taguchi ortogonal deney düzenine göre araştırmışlardır. Minimum yüzey pürüzlülüğü için en küçük en iyi, maksimum oyma derinliği için en büyük en iyi kalite karakteristiklerini kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre matematiksel bir model oluşturmak için regresyon analizi yapmışlardır.

Anawa and Olabi (2008), iki farklı çeliğin lazerle kaynak işleminde kayna parametrelerinin (güç, hız ve odak mesafesi) çekme mukavemetine etkisini tespit etmek için L_{25} Taguchi ortogonal deney düzenine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deney verilerine göre çekme mukavemeti için doğrusal regresyon kullanarak matematiksel bir model oluşturmuşlardır.

Matoorian et al. (2008), yüksek hız çeliğinin dalma erozyonla işlenebilirliğinde işlem parametrelerinin oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik olarak (2^1x3^7) Taguchi orthogonal deney düzenine göre deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir.

2. LAZER IŞININ ÜRETİLMESİ

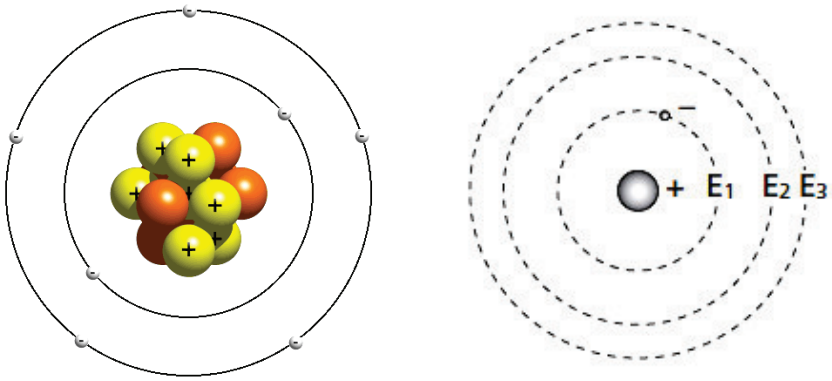
Lazer, uyarılmış ışıma ile kuvvetlendirilmiş ışık anlamına gelen Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation kelimelerinin baş harflerinden oluşmaktadır. Bu ışık, bir cam hazne içerisinde uygun bir aktif ortamda bulunan gaz atomlarının uyarılması, uyarılmış atomların ortama foton yayması ve bu fotonların hızlandırılması esasına dayanmaktadır. Lazer ışının üretildiği cihazlar dört ana bölümden oluşmaktadır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004). Bunlar;

- Aktif ortam,
- Uyarma mekanizması,
- Geri besleme mekanizması,
- Çıkış bağdaştırıcısı,

Lazer aktif ortamını ve atomların uyarılma mekanizmalarını anlayabilmek için lazer fiziğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, bu bölümde lazer üretiminin fiziksel prensipleri ele alınmıştır.

2.1 Lazer Fiziği

Bir atom çekirdek, pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşurken, çekirdeğin etrafında da negatif yüklü bir elektron bulutu vardır. Atomdaki proton sayısı elektron sayısına eşit olduğunda atom elektriksel olarak yüksüzdür.



Şekil 2.1 Atom yapısı (http://img7.imageshack.us/img7/9563/atommodel03.gif, 2010), (www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

Her atomun kararlı olduğu bir enerji seviyesi vardır (Bkz. Şekil 2.1). Atomlar herhangi bir uyarıcıyla uyarıldıkları zaman daha üst enerji seviyesine

çıkarlar ve çok kısa bir süre sonra tekrar kararlı oldukları enerji seviyesine geri dönerler. Tüm atomlar en düşük potansiyel enerjiye sahip oldukları konumdayken, mutlak sıfır sıcaklığında taban seviyesindedirler. Taban seviyesindeki bir atom, bir kaynaktan sağlanan enerji ile uyarıldığında üst bir enerji seviyesine geçer. Bu geçiş atomun elektronlarının enerji değişimlerinden sağlanan hareketlenme ile gerçekleşir.

E_1 (taban enerji seviyesi) ve E_2 (üst enerji seviyesi) gibi iki enerji seviyesi olduğu kabul edilsin. E_1 enerji seviyesindeki bir atom herhangi bir uyarıcı vasıtasıyla uyarıldığında bir üst enerji seviyesine çıkar. Yüksek enerji seviyesine ulaşan bu atom kararsız durumdadır ve yüklü olduğu fazla enerjiyi ortama bırakıp tekrar kararlı olduğu konuma geçmek ister. Atom üst enerji seviyesinde yaklaşık 10^{-8}s kadar kalabilir ve ortama "elektromanyetik dalga" yada "foton (ışık parçacığı)" yayarak kendi enerji seviyesine geri döner. Bu olaya "kendiliğinden emisyon" (spontaneous emission) denmektedir (Svelto, 2010). Şekil 2.2, kendiliğinden emisyon olayını göstermektedir. Kendiliğinden emisyon olayı sonucunda enerji farkından dolayı ortaya çıkan foton sistem içerisinde herhangi bir yönde hareket edebilir. E_1 enerji seviyesinde bulunan atomları E_2 enerji seviyesine çıkaracak uyarma mekanizmaları aşağıdaki mekanizmalar ile gerçekleşir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004);

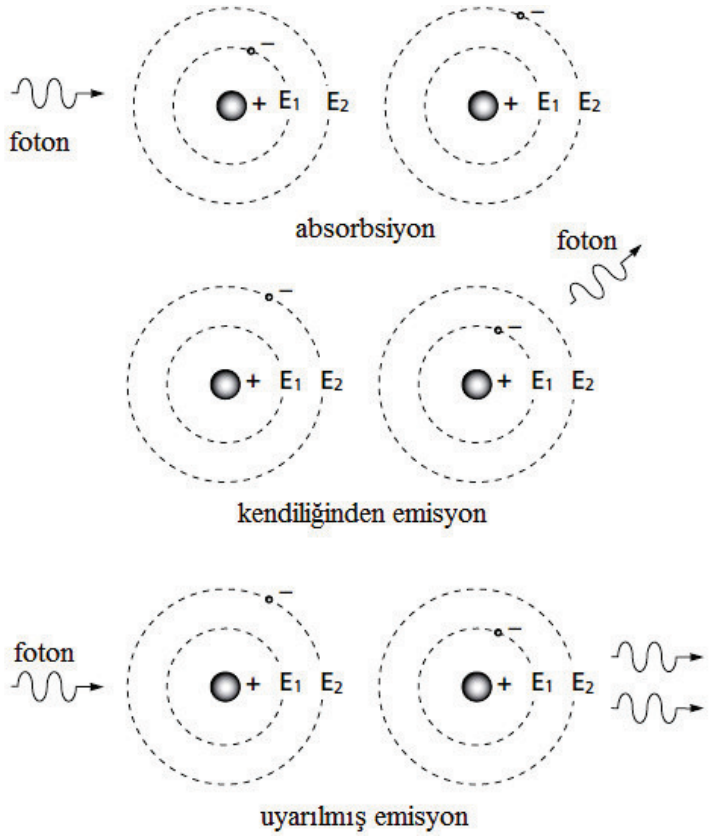
- Isıtılarak,
- Basınç uygulayarak,
- Hızlandırılmış elektron bombardımanı ile,
- Hızlandırılmış parçacıklarla bombardıman ile,
- Işık demetine maruz bırakılarak

Atomun enerji seviyesini değiştirmesi olayında kaybettiği enerji "E" aşağıdaki gibidir (Svelto, 2010).

$$E = h.\nu = E_2 - E_1 \tag{2.1}$$

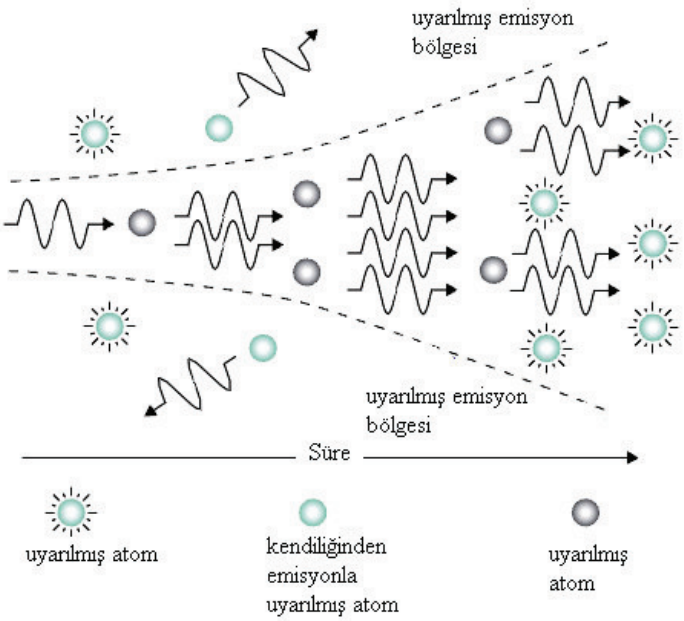
Formülde; h = Plank sabiti,
ν = Yayılan dalganın frekansı
E_2 = Yüksek enerji seviyesi (Uyarılmış seviye)
E_1 = Düşük enerji seviyesi (elektronun kararlı olduğu seviye)

Her atom, kararlı olduğu enerji seviyesinde bulunduğu ve herhangi bir uyarıcı mekanizma etki etmediği sürece konumlarını muhafaza ederler. Başlangıçta bir atomu hareket ettirecek temel mekanizma dışarıdan bir kaynaktan enerji gönderimi ile olur. Bunun dışında aktif ortamda atomların enerji seviyeleri arasındaki hareketi sırasında ortama bıraktıkları fotonlar da uyarıcı olarak sistemde atomların hareketini sağlarlar. Bir atoma ν frekansındaki bir fotonun çarpması durumunda fotonun yüklü olduğu enerji ($E_2 - E_1$) atom tarafından yutulur. Bu durumda taban seviyesindeki atom üst enerji seviyesine çıkmaktadır. Bu olay absorbsiyon yada yutma olarak adlandırılır (Svelto, 2010). Yüksek enerjili yarı kararlı konumdaki bu atom, kendi frekansına yada enerjisine uygun başka bir foton tarafından daha uyarıldığında tekrar taban seviyesine geçmektedir. Bu olaya uyarılmış emisyon (stimulated emission) denilmektedir. Bu durumda enerji farkı, çarpan fotonun enerjisine ilave olmaktadır. Uyarılmış emisyon olayında, taban seviyesindeki atomu uyaran foton ile ortama yayılan foton aynı dalga boyunda, aynı enerjide ve aynı yöndedir. Bu uyarma olayından sonra ortama iki foton bırakılmış olunur. Şekil 2.2'de kendilinden ve uyarılmış emisyon olayı görülmektedir (www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010).



Şekil 2.2 Kendiliğinden ve uyarılmış emisyon
(www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

Kendiliğinden emisyon ile uyarılmış emisyonun (Bkz. Şekil 2.3) lazerle bağlantısını kurmak gerekirse;



Şekil 2.3 Kendiliğinden ve uyarılmış emisyon ile foton üretimi
(www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

Şekil 2.3'deki gibi bir grup atom olduğu düşünülsün. Bu atomların bir kısmının dış kaynaktan uyarıldığı ve bir kısmının da fotonlar tarafından uyarıldığı düşünülsün. Gelen bir fotonun ilk atomla etkileşime geçmesi ve sonra da ortama iki foton yayılması ve bu iki fotonun iki ayrı atomla etkileşimi sonucunda dört farklı foton yayınımı söz konusudur. Prosesin sonucunda ortama bırakılan tüm fotonlar aynı frekansta ve yöndedir. Başka bir deyişle başlangıçta ilk atomu uyaran foton sonraki atomların yükseltgeci olmuştur. Bununla birlikte atomları üst enerji seviyesine çıkaran dış bir enerji kaynağı vardı ki buna pompalama adı verilir (www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010).

Enerji konumlarındaki değişim, atomları yarı kararlı enerji seviyesine yükseltir. Bazı durumlarda atomlar taban seviyesine hemen dönmek yerine, yükseltilmiş enerji seviyesinde bir süre kalır. Bu durumda o enerji seviyesinde atom sayısında artış meydana gelir. Bir malzemede, taban seviyesindeki atom sayısından daha fazla sayıda atom üst enerji seviyesine pompalanabilir. Bu duruma nüfus terslenmesi (population inversion) denir. Bununla birlikte, atomların gerçek nüfus yoğunluğunda, uyarılmış olma olasılığı oldukça düşüktür ve atomların hepsi birlikte uyarılmış konumda değildir. Boltzmanın prensiplerine

ve termodinamiğin birinci kanunu göre, yığın halindeki atomlar termal denge konumundadır. Farklı iki E_1 ve E_2 enerji seviyesi ve bu enerji seviyelerinde sırasıyla atom yoğunluğu (atom sayısı) N_1 ve N_2 olmak koşulu ile, termal denge durumunda nüfus dağılımı denklemi, (www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010),

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \tag{2.2}$$

Formülde; k: Boltzman sabiti ($1{,}380 \times 10^{-23}$ J/K molekül)
T: Malzemenin sıcaklığı

Formüle göre, bir malzeme $N_2<N_1$ olması durumunda gelen fotonu yutar, $N_2>N_1$ olması durumunda yükseltgeç gibi davranır. Bir malzemede nüfus tersine çevirme olayının gerçekleşmesi için $N_2 - N_1>0$ şartının yerine getirilmesi gerekir. Boltzman kanunlarına göre, yüksek enerji seviyelerinde az sayıda uyarılmış atom bulunur ve yüksek enerji seviyelerinde atom yoğunluğu enerjiyle üstel olarak azalır (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Tarakçıoğlu ve Özcan'a (2004) göre lazer ortamından ışın demeti elde edebilmek için aşağıdaki üç şartın gerçekleştirilmesi gerekir,

- Sistem, bir nüfus terslenmesi durumunda olmalıdır, (yani uyarılmış durumda, taban durumunkinden daha fazla atom bulunmalıdır),
- Sistemin uyarılmış durumu yarı kararlı bir durum olmalıdır,
- Yayılan fotonlar diğer uyarılmış atomlardan uyarılmış ışıma yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içerisinde tutulmalıdır.

2.2 Lazer Üretecinin Temel Elemanları

Lazerin fiziksel prensiplerinden yola çıkılırsa şu sonuca ulaşılabilir; lazer, enerji verilmiş (uyarılmış) atomların bıraktıkları fotonları kontrol eden bir aygıttır. Bir lazerde üretecinde; atomların uyarıldığı, fotonların üretildiği (ışık demetinin) bir aktif ortam, atomları uyarılmış düzeye çıkaracak bir uyarma mekanizması (pompalama sistemi), fotonların ileri geri hareketini sağlayacak bir geri besleme mekanizması ve sonuçta da çok yoğun bir ışık demetinin elde edileceği çıkış bağdaştırıcısına ihtiyaç vardır. Buna göre bir lazer üretecinde bulunan temel elemanları sıralamak gerekirse (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004),

- Aktif ortam
- Uyarma mekanizması
- Geri besleme mekanizması
- Çıkış bağdaştırıcısı

2.2.1 Aktif ortam

Sadece nüfus terslenmesine uğrayabilen malzemeler, lazer için aktif ortam olarak kullanılırlar. Aktif ortam, en alt enerji düzeyinde bulunan atomların sayısından uyarılmış durumdaki atomların sayısının fazla olması durumunu gerçekleştirmek için kullanılır. Lazer ışık kaynağının oluşması için aktif ortamda şu iki durumun oluşması gerekmektedir;

- Aktif ortamda atomlar, foton yaymak üzere kendiliğinden uyarım yapabilecek uyarılmış emisyon seviyelerinde bulunmaları gerekir,
- Foton yayarak en alt seviyeye düşen elektronların sayısından, uyarılmış atomların sayısı fazla olacak şekilde, en alt seviyeden elektronların uyarılmış seviyeye pompalanmaları gerekmektedir.

Aktif ortam; gaz, sıvı, katı – hal ve yarı iletken olabilir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

2.2.2 Uyarma mekanizması

Aktif ortamda uyarılmış durumdaki atomların sayısının en alt seviyede uyarılmamış durumdaki atomlardan daha fazla olması için bir enerji kaynağı tarafından pompalanması yani uyarılması gerekir. Uyarma mekanizması, yarı iletken ve gaz lazerlerde elektrik akımı ile, katı ve sıvı lazerlerde ise optik pompalama ile olur (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).

2.2.3 Geri besleme mekanizması

Lazerin oluşumu için bir osilasyona ve bunun içinde bir geri besleme mekanizmasına gerek duyulmaktadır. Geri besleme için aktif materyalde, optik rezonatör kullanılmalıdır. Geri besleme işlemi, aktif materyalin her iki ucuna yerleştirilmiş yansıtıcı aynalarla yapılmaktadır. Osilasyon işlemi, elektromagnetik dalgaların (fotonlar) aktif ortam içerisinde ileri geri gidip gelerek gelişimini sürdürmesidir. Yansıtıcı aynalara çarpıp, ileri geri yansıyan fotonlar aktif materyal

tarafından yükseltilir. Fotonların sayısı, belli bir değere ulaştığında, foton (ışık) demetini çıkışa iletmek için, aynalardan birisi kısmi geçirgen yapılır. Osilasyon işlemi başladığında, aktif materyalde çıkış aynasından çıkan ışık demetlerinin karşılanması gerekmektedir.

2.2.4 Çıkış bağdaştırıcısı

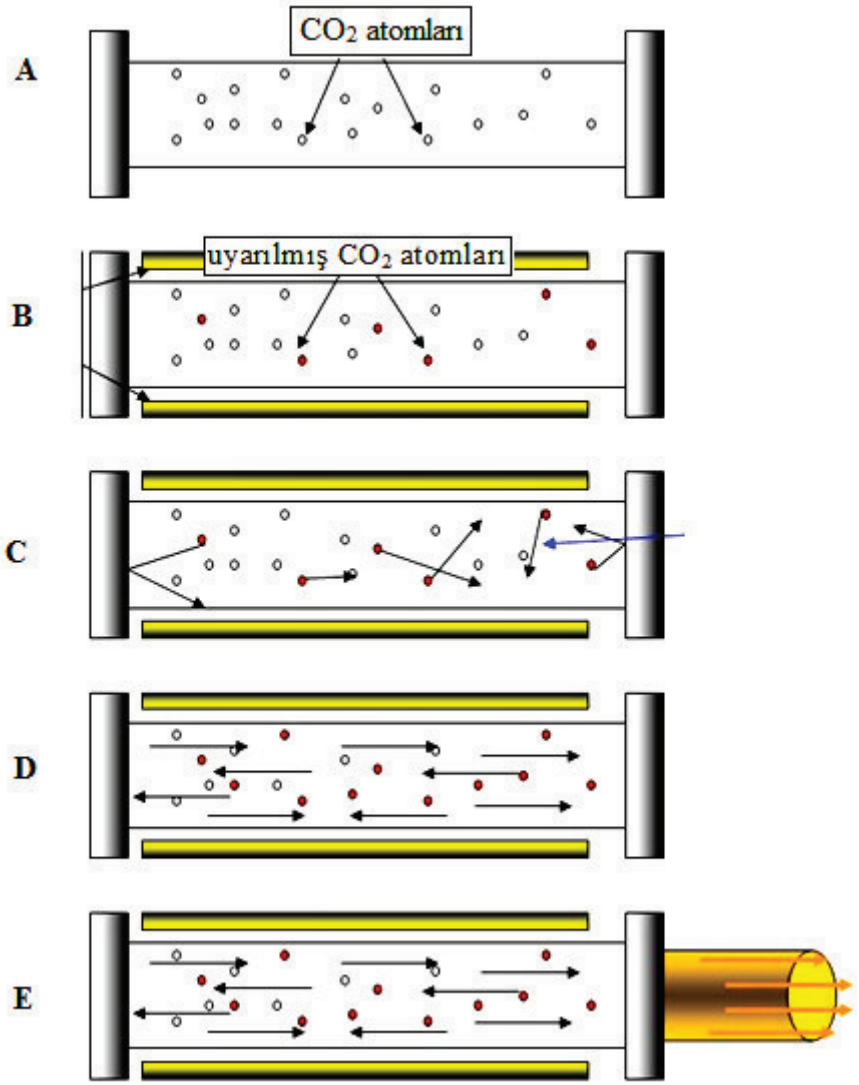
Çıkış çifti, yansıtıcı iki ayna arasındaki lazer ışığının bir kısmının aktif ortamdan lazer ışık demeti olarak dışarıya çıkmasına izin veren kısımdır (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004). Aynalardan biri kısmi geçirgendir ve bu ayna aktif ortamdaki fotonların bir kısmını ortamdan dışarı ışık olarak yansıtır geri kalan kısmı da foton üretimine devam etmektedir.

Şekil 2.4A'da, lazer aktif ortamında CO_2 atomları görülmektedir. Lazer ortamının sağ ve sol tarafında birer ayna bulunmaktadır ve sol taraftaki ayna yarı geçirgendir. Şekil 2.4B'de, CO_2 atomları bir uyaranla (flaş ışığı yada elektriksel deşarj) uyarılarak hareketlendirilmiştir. Şekil 2.4C'de, hareketlenen atomlar fotonlar yaymaya başlamışlardır. Şekil 2.4D'de, bu fotonlar aynalar arasında ileri geri hareketleri yaparak atomlarla çarpıştırılarak foton sayısı arttırılmaktadır. Böylece nüfus terslenmesi olayı gerçekleştirilmiş olunur. Şekil 2.4E'de ise, fotonlar yarı saydam aynadan yansıyarak lazer ışınını üretmiş olurlar.

2.3 Lazer Işığını Özellikleri

Lazer ışığının normal ışıktan çok farklı olan özellikleri (Svelto, 2010);

- Bırakılan ışık tek renklidir,
- Düz, yoğun ve paralel dalgalar halindedir,
- Genliği yüksek ve şiddetlidir,
- Hedeflendiği noktada dağılmaz yani odaklandığı noktada büyük enerji yoğunluğu elde edilebilmektedir,



Şekil 2.4 CO_2 lazerinin üretim aşamaları

(http://machine-tools.netfirms.com/21_laser_versus_water_jet.htm, Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

2.4 Endüstride Kullanılan Lazer Çeşitleri

Lazerler genellikle lazer ışının üretiminde kullanılan aktif ortama bağlı olarak dört temel grupta sınıflandırılmıştır. Bunlar;

- Katı hal lazerleri
- Gaz lazerleri
- Yarı iletken lazerler
- Boya lazerleri

2.4.1 Katı hal lazerleri

Katı hal lazerlerde, genellikle kristal veya cam gibi katı malzemeden yapılmış olan bir çubuk kullanılmaktadır. Çubuğun esas malzemesi cam veya kristaldir (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004). Bu tip lazerler, aktif ortamda kullanılan katı bir malzemeye iyonların karıştırılmasından oluşturulmuştur. Lazer malzemesi olarak kullanılan iyonlar bu ana malzemeye karıştırılır.

İlk katı hal lazerler 1960 yılında Maimam tarafından yakut lazer olarak üretilmiştir. Bununla birlikte, Nd:YAG, Nd: glass, alexandrite ve Ti: sapphire katı lazerler grubu içinde yer almaktadır. Katı hal lazerleri arasında endüstride en çok kullanılan Nd: YAG lazerlerdir. Nd: YAG lazerlerde, $Y_3Al_5O_{12}$ temel elemandır ve %2 oranında Nd_{3+} (Neodiyum) iyonları ile karıştırılarak kullanılır. Nd_{3+} (Neodiyum), dört seviyeli enerji sistemine sahiptir. Bu tip enerji seviyesine sahip sistemlerde nüfus terslenmesi daha kolay gerçekleşmektedir. Böylece, daha basit bir flaş lambası ile daha güçlü bir pompalama enerjisi sonucu yeterli miktarda nüfus terslenmesi elde edilebilir. Bu tür lazerlerde, lazer aktif ortamdaki iyonlar bir ışık kaynağı ile uyarılır. Işık aktif uyarıcı olarak iyonları uyarmaya devam ettiği sürece ışın üretimi de devam etmektedir (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Nd:YAG lazerler sürekli moda (CW) ve darbeli modda olabilir. Pompalama için gerekli ışık kaynağı, kristalin absorbsiyon özelliğine bağlıdır. CW moddaki işlemler, lazer krypton yada xenon dolgulu ark lambaları ile uyarılır. Darbeli işlemler için genellikle flaş lambalar kullanılır (Dahotre ve Harimkar, 2008).

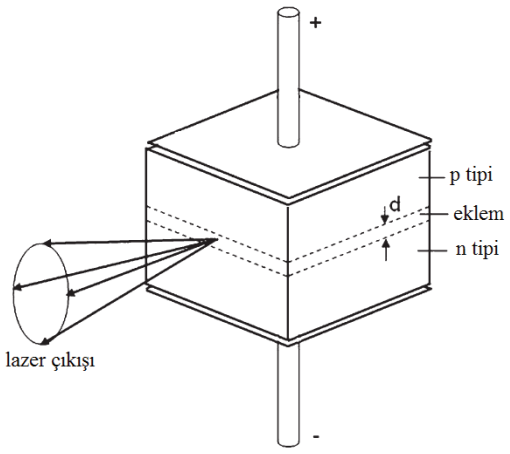
2.4.2 Gaz lazerleri

Gaz lazerlerde, aktif lazer ortamı bir gazdan oluşmaktadır. Gaz lazerler, atomik, iyonik ve moleküler lazerler olarak sınıflandırılır. Cam bir tüp içindeki düşük basınca sahip gaz elektrik akımıyla uyarılır. Yüksek enerjili elektronlarla çarpışan gaz atomları yüksek enerji seviyelerine çıkarlar ve kendiliğinden emisyon olayının gerçekleşmesiyle ortama foton yayıp kararlı olduklara seviyelere geçerler. Endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan gaz lazerleri CO_2 lazerlerdir ve bu lazerler moleküler lazer grubu içinde yer almaktadır. CO_2 gazına nitrojen ve helyum gazları ilave edilir ve genellikle CO_2 lazerleri, üçünün karışımından oluşur. Lazer olayı, nitrojen atomlarının bir elektrik kaynağı tarafından titreşimsel olarak uyarılması ile başlar. Helyum gazının ilavesi de çıkış

gücünü arttırır. Bir CO_2 lazerin özelliği sırlanmış bir tüp içindeki gazın eksenel yada çapraz akışı ile belirlenir (Dahotre ve Harimkar, 2008).

2.4.3 Yarı iletken diyot lazerler

Yarı iletken diyot lazerlerde aktif ortam, yarı iletken malzemelerden oluşur. İlk bakışta yarı iletken lazerler katı lazer grubundan gibi görünse de gerçekte farklı bir grup oluşturmaktadırlar. Yarı iletken lazerlerin temelini ışınım taşıyıcıların bileşimi oluşturmaktadır. Yarı iletken lazerlerin işleme prensibini anlayabilmek için yarı iletkenlerin enerji bantlarını anlamak gerekmektedir. Her bir iletken malzemenin elektronları da kendi içinde bir enerji seviyesine sahiptir. Bir eklem yeri düşünülsün (Bkz. Şekil 2.5). Bir eklem noktası p – tip silikon ve n – tip silikon gibi iki farklı yarı iletken malzemenin birleştiği noktadır. Burada eklem noktası iki yarı iletkenin birleştiği ara yüzeydir.



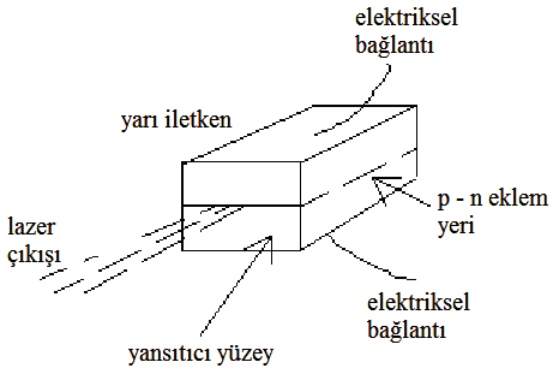
Şekil 2.5 p ve n eklem bölgesi (Dahotre ve Harimkar, 2008)

Eklem noktasında üç tip enerji bandı vardır. Bunlardan biri açık tiptir ve bu enerji bandında, p tip yarı iletken n tip yarı iletkenle temastadır. n tipinde çok sayıda elektron ve p tipinde ise çok sayıda delik vardır. Bu durumda n tipindeki elektronlar p tipine doğru geçiş yapar. Aynı şekilde p tipindeki boşluklarda n tipine doğru geçiş yapar. Elektronların ve boşlukların difüzyon ile taşınması eklemin her iki kenarında ayrılmalarla sonuçlanır. Bu durum sonucunda elektriksel alan daha fazla taşınıma izin vermez. Denge konumunda n tipindeki bir elektronun p tipine geçebilmesi için mevcut potansiyel enerjisini aşması gerekir. Eğer dış bir kaynaktan bir enerji verilirse, p tipi bölge negatif ve n tipi bölge pozitif yapılırsa dış kaynaklı enerji mevcut enerjiye eklenmiş olur ve sonuçta potansiyel enerji seviyesinde yükselme olur. Böylece elektronların bölgeler arası geçişi zorlaşır. Bununla birlikte tersi durum olursa yani p bölgesi pozitif ve n

bölgesi negatif yapılırsa potansiyel enerji seviyesi düşer. Bu durumda bölgeler arası elektron geçişleri mümkün olur. Böylece devredeki pil tekrar doldurulmuş ve eklem bölgesine akım geçişi sağlanmış olunur. Sistemde sırasıyla, p ve n bölgelerinde geçiş yapan elektronlar ve boşluklar, alt akım taşıyıcısı ve yeniden birleşime uğramış gibi davranırlar. Bu alt akım taşıyıcılarının yeniden birleşme durumu fotonların kendiliğinden emisyonu ile sonuçlanır ve bunlar LED'lerin temelini oluşturur. Belirli koşullar altında lazer olayı gerçekleşir.

Genel bir ifade ile yarı iletken lazerler, katkılandırılmış farklı iki türden yarıiletken malzemenin (p ve n) bir birleşim düzleminde yan yana getirilmesidir. Bu şekilde birleştirilmiş iki malzemeyi içiren sistemden yüksek şiddette sahip bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde, pozitif gerilim p tarafına ve negatif gerilim n tarafına verildiği zaman elektronlar, n tarafından p tarafına geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonların atomlara çarpmasıyla birlikte yeni fotonlar üretilir ve böylece lazer ışığı üretilmiş olunur (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Bir diyottan lazer elde etmek için yukarıdakilere ek olarak optik çukurun olması gerekmektedir. Bu amaçla bir yarı iletken lazer diyotun iki tarafı eklem yüzeyine dikey ve birbirine paralel olarak kesilir ve kesilmiş yüzeyler parlatılır. Bu parlatılmış kenarlar diğer lazer sistemlerindeki aynaların görevini gerçekleştirir (Bkz. Şekil 2.6). Böylece fotonların hareketi hızlandırılır. (Tarakçıoğlu ve Özcan, 2004).



Şekil 2.6 Yarı iletken diyot parçaları

(http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm, Erişim tarihi: 2010)

En çok kullanılan yarı iletken malzeme alüminyum galyum arsenide'dir.

2.4.4 Boya lazerler

Sıvı boya lazerlerde aktif lazer malzemesi olarak uygun sıvı solventler içinde çözülebilen sıvı solüsyonlar kullanılır. En önemli özelliği; boya çeşidine göre lazer dalga boyu değişebilmektedir. Boya lazeri, rodamin-6G, kumarin, stilben veya tetratin gibi organik boyalarla dolu 1 cm uzunluğunda bir cam tüpten oluşur. Boya hücresi, ön tarafta kısmen yansıtan bir ayna ve arka tarafta ise kırınım ızgarası bulunan bir deliğin içindedir. Dalga boyunu değiştirmek amacıyla bu ızgara deliğin içine yerleştirilir. Işık kaynağı, boyayı ve lazerin etkisini aktive etmek için boyanın üstüne odaklandırılır. Flaş tüpünün patlaması ile sıvı harekete geçirilir. Bu sırada boya moleküllerinin enerji düzeyleri yükseltilerek foton üretilir. Bu işlem dahili aynaların geri besleme işlemini yapıncaya kadar sürer. Atomların tüp içinde gidip-gelme hareketi bir miktar ışığın kısmi yansıtıcı aynadan lazer ışını olarak çıkmasına kadar devam eder. Boya lazerleri kimyasal analiz işlemlerinde kullanılır (Dahotre ve Harimkar, 2008).

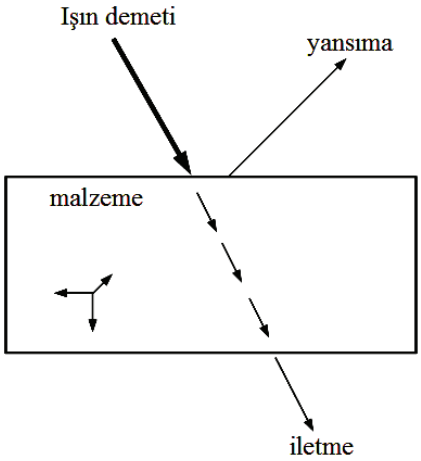
3. LAZER IŞININ METAL İLE ETKİLEŞİMİ

Lazer ışını kullanılarak metal bir yüzeyin işleme karakteristiğini anlayabilmek için lazer ışının metalle etkileşimi sırasında meydana gelen fiziksel süreçleri bilmek gerekmektedir. İş parçası yada metal yüzeyinde elektromanyetik bir ışıma söz konusu olduğunda yansıma, kırılma, absorbsiyon (soğurma) ve iletim gibi bazı olaylar meydana gelmektedir. Lazer ışınıyla metal etkileşimi sırasında gerçekleşen en önemli olay ışımanın metal tarafından soğurulmasıdır. Metalin ışımayı soğurması sonucunda ısınma, ergime, buharlaşma ve plazma oluşumu gibi etkiler meydana gelir ki bu durum lazer kaynaklı tüm işleme tekniklerinde söz konusudur. Elektromanyetik ışınım ve malzemenin ısıl – fiziksel özellikleri bu etkilerin kapsamını oluşturmaktadır.

3.1 Lazer Işının Absorbsiyonu

Lazer ışımanın temelini eletromanyetik dalgalar oluşturur. Bir ışının absorbsiyonu, elektromanyetik ışıma sonucu metalin atomlarının etkileşimiyle açıklanabilir. Lazer ışıma, elektromanyetik bir ışımadır ve elektriksel (E) ve manyetik (H) bir alanla ifade edilir (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Elektromanyetik ışıma (lazer ışını) bir yüzeyi etkilediğinde, yansıma ve iletime uğrar. Işının bir kısmı iletilir, bir kısmı yansıtılır ve bir kısmı metal tarafından absorbe edilir (Bkz. Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Lazer ışının metalle etkileşimi (Dahotre ve Harimkar, 2008)

Elektromanyetik ışıma sadece metal atomlarının elektronları ile etkileşebilir, çünkü yüklü çekirdekler lazer ışımanın yüksek frekanslarını takip edemez.

Elektromanyetik ışıma elektronların üzerinden geçerken bir güç uygular ve ışımanın meydana geldiği elektriksel alan ile atomların hareketlenmesini sağlar. Bilindiği gibi elektriksel ve manyetik alanlar aynı miktarda enerji taşırlar. Absorbe edilen ışıma ile serbest atomların kinetik enerjileri artar ve uyarılmış yani enerji yüklenmiş duruma geçer. Kendi enerji seviyelerinde bulunan atomlar uyarılma sonucu bir üst enerji seviyesine geçerler ancak atomlar bu seviyesinde kalmayıp tekrar kendi enerji düzeylerine inerler. Bu durumda her bir atom yüklenmiş olduğu fazla enerjiyi ortama bırakır ki bu fazla enerji ortamda elektromanyetik dalga (foton) olarak yayılır. Bu olaya absorsiyon yada yutma denir. Absorbsiyon katsayısı malzemenin yoğunluğuna, ışınımın dalga boyuna, iletim ve valans bandları arasındaki enerji aralığına bağlıdır. Bir metalin absorbsiyonluğu aşağıdaki denklemle ifade edilir.

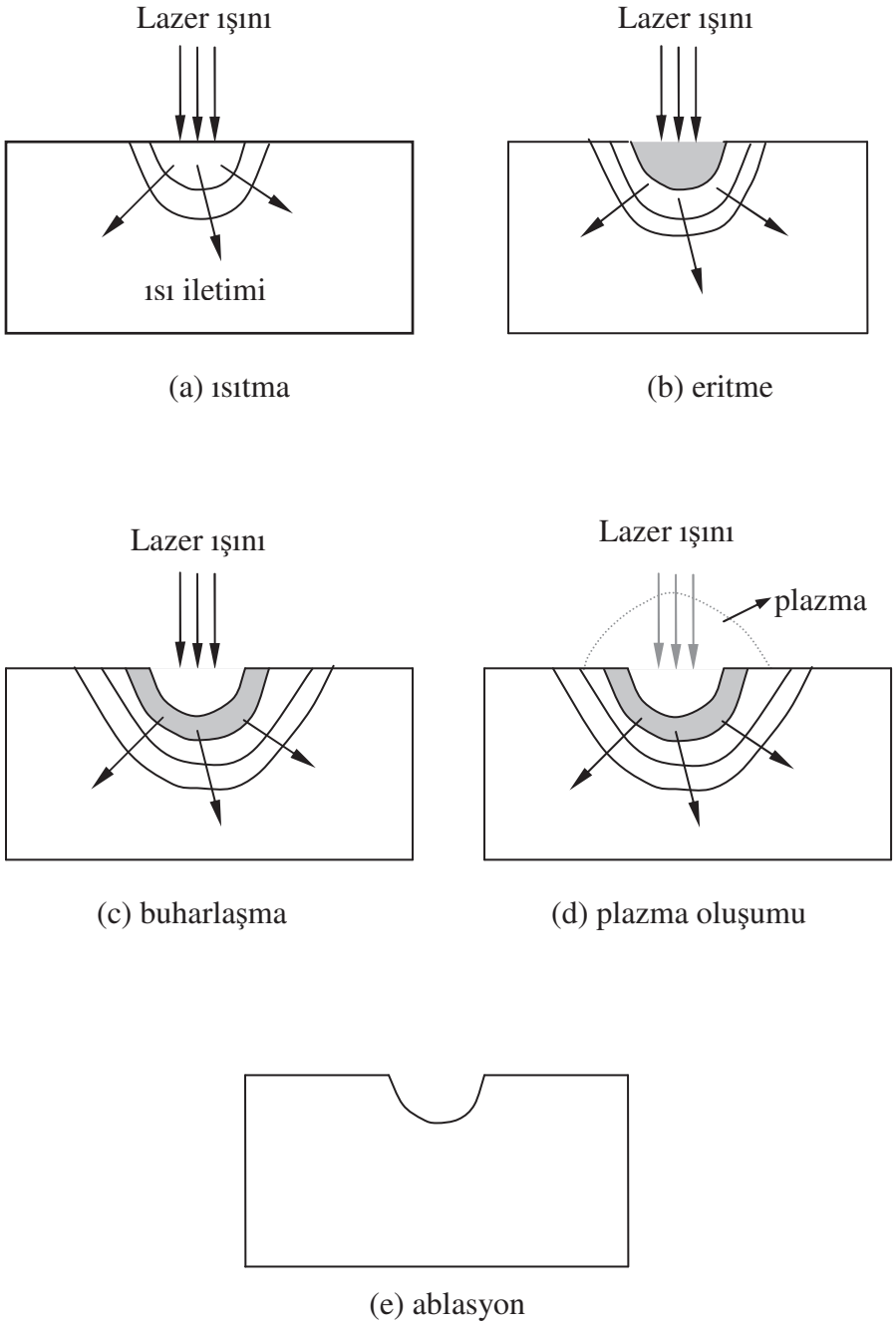
$$A_b = 1\text{-}R \tag{3.1}$$

Bu denklemde, A metalin yutma oranını ve R metalin yansıtma oranını ifade etmektedir.

Metallerin iletkenliği genellikle artan dalga boyuyla artar. Bu nedenle, küçük dalga boylarında metallerin absorbsiyonu artar yani daha az yansıtma özelliği gösterir. Bununla birlikte, metalin yansıtıcılığının dalga boyuna bağlılığı (absorbsiyon) kurallardan sadece biridir çünkü absorbsiyona etki eden başka faktörlerde vardır. Örneğin, bir metalin yansıtıcılığı, genellikle artan sıcaklıkla azalır. Bu yüzden, düşük sıcaklıkta yansıtıcılığı oldukça yüksek olan bir metalin yüksek sıcaklıkta absorbsiyonu yüksek olabilir. Bu durum lazerle metal işleme uygulamaları için belirgin bir öneme sahiptir. Böylece lazer ışınıyla metal etkileşiminde yüzey sıcaklıkta belirgin bir artış sağlanmış olunur. Diğer önemli faktörlerde ışının geliş açısı ve metalin yüzey özelliğidir (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Lazer metal etkileşimi sırasında metal tarafından absorbe edilen lazer enerjisi ısı enerjisine dönüştürülür. Işık enerjisinin, ısı enerjisine dönüşmesi ve metal içine iletimi metalde ısı dağılımını belirler. Isı artışının büyüklüğüne bağlı olarak, metalde ısınma, ergime ve buharlaşma gibi değişik fiziksel etkiler meydana gelir. Bunun dışında, lazer ışının yayınması sırasında buharın iyonize olması plazma oluşumuna sebep olmaktadır. Şekil 3.2'de lazer metal etkileşiminde etkileşim süresi ve lazer ışınının güç yoğunluğuna bağlı olarak farklı rejimler ve lazerle yapılan metal işleme uygulamalarını göstermektedir.

Bununla birlikte, lazerle metal arasındaki etkileşim süresi ve lazer ışınının güç yoğunluğu bu etkileşimde spesifik bir etkiye sahiptir (Dahotre ve Harimkar, 2008).



Şekil 3.2 Lazer ışını - metal etkileşiminde meydana gelen fiziksel olaylar (Dahotre ve Harimkar, 2008).

(a) Isıtma,

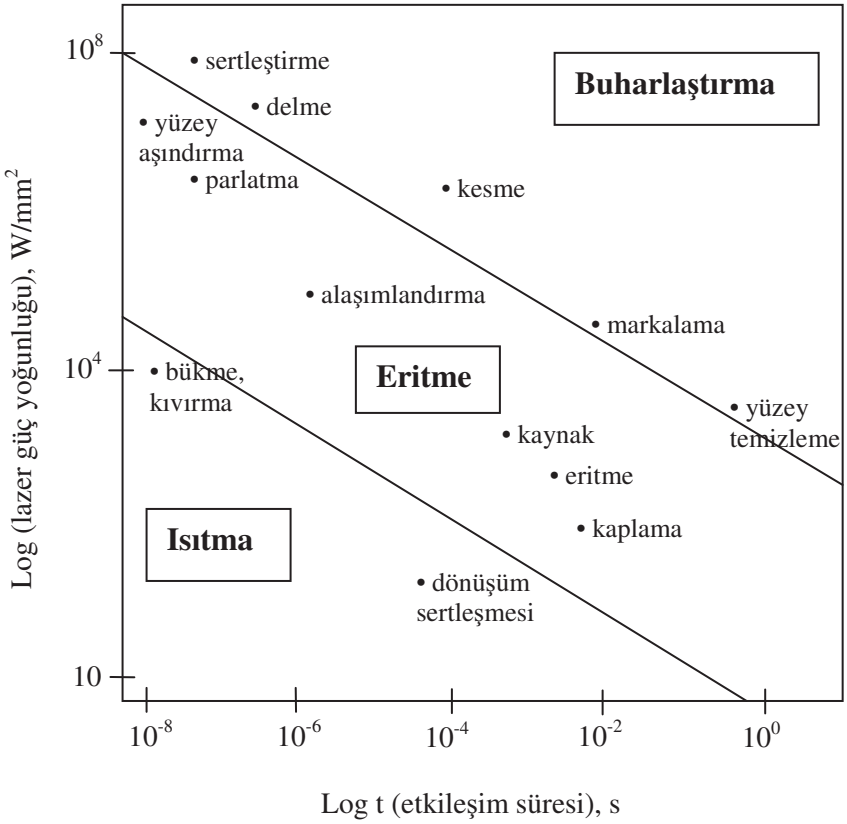
(b) Yüzeyi eritme,

(c) Etkileşim bölgesindeki metalin buharlaştırılması,

(d) Plazma oluşumu,

(e) Ablasyon,

Lazer - metal etkileşimde Şekil 3.2'de gösterilen fiziksel ve ısıl süreçler, etkileşim süresi ve lazer gücünün bir fonksiyonu olarak endüstride farklı uygulamalarda kullanılmaktadır (Bkz. Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Lazerle metal yüzey uygulamaları için proses haritası (Majumdar ve Manna, 2003), (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Şekilde görüldüğü gibi lazerle yüzey işlemleri üç temel gruba ayrılmaktadır. Bunlar, ısıtma (eritme ve buharlaştırma yok), eritme (buharlaştırma yok) ve buharlaştırma. Şekilde bükme, kıvırma ve dönüşüm sertleşmesi işlemleri için lazer ışını uygun güç aralığında ve etkileşim süresinde tutmak gerekmektedir. Isıtma işlemi için daha az güç ve etkileşim süresi gerekmektedir. Bu aralıkta tutulan yüzey sadece ısıtma işlemine tabi tutulmuş olunur. Bununla birlikte kesme, delme, şok sertleştirme, markalama ve yüzey temizleme işlemi için ısıtmaya göre daha uzun etkileşim süresine ve güce ihtiyaç vardır ki bu durumda yüzey sıcaklığı buharlaştırma sıcaklığına ulaşmaktadır (Majumdar ve Manna, 2003).

3.2 Isıl Etkiler

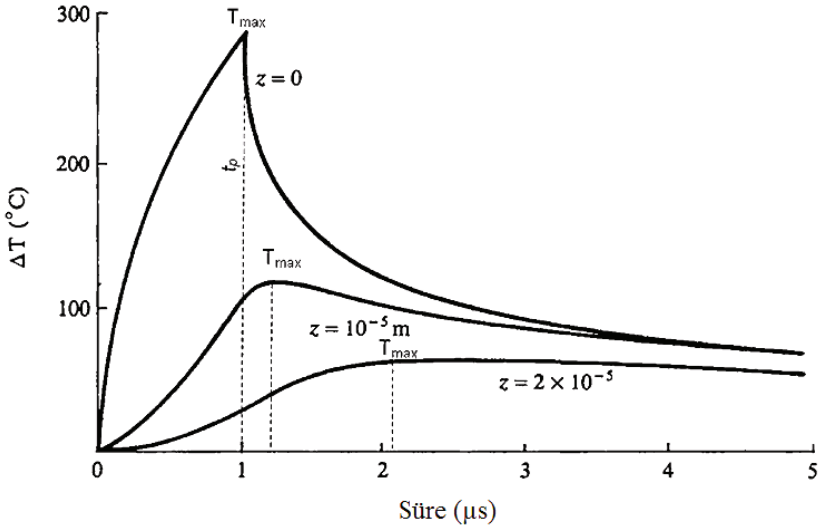
I_0 şiddetindeki bir lazer ışını, metal yüzeyiyle etkileşime geçtiği zaman metaldeki atomlar uyarılır, titreşime geçirilir yada her iki durumda birlikte söz

konusu olur. Bu uyarma enerjisi (ışık enerjisi), metaller için 10^{-13}s içinde ve metal dışı malzemeler için 10^{-12}s içinde ısı enerjisine dönüşür. Bu dönüşümü takiben malzeme içine iletim ve metal yüzeyinden taşınım ve yayılım gibi bazı ısı transferi prosesleri meydana gelir. Bu dönüşümlerde en önemli olan olay, oluşan ısının malzeme içine doğru taşınımıdır. Malzemenin ısıl-fiziksel özelliklerine ve lazer parametrelerine bağlı olarak, yüzeyde ısı oluşumu ve malzeme içine iletimi ısı dağılımını oluşturur. Lazer ışının şiddeti yeterince yüksek olduğunda yüzeyde eritme ve buharlaşma gibi faz dönüşümlerinin oluşması söz konusu olur. Ergitme ve buharlaştırma birçok işleme prosesi için malzeme kaldırma mekanizmasının verimlililiğinde etkili olmaktadır (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Lazer metal etkileşimi sırasında ısı değişimi sırasında aşağıdaki olaylar gerçekleşir. Buna göre Şekil 3.4'de bakır bir malzeme için çizilmiş lazer etkileşim süresi ve sıcaklık ile ilgili grafik görülmektedir. Buna göre,

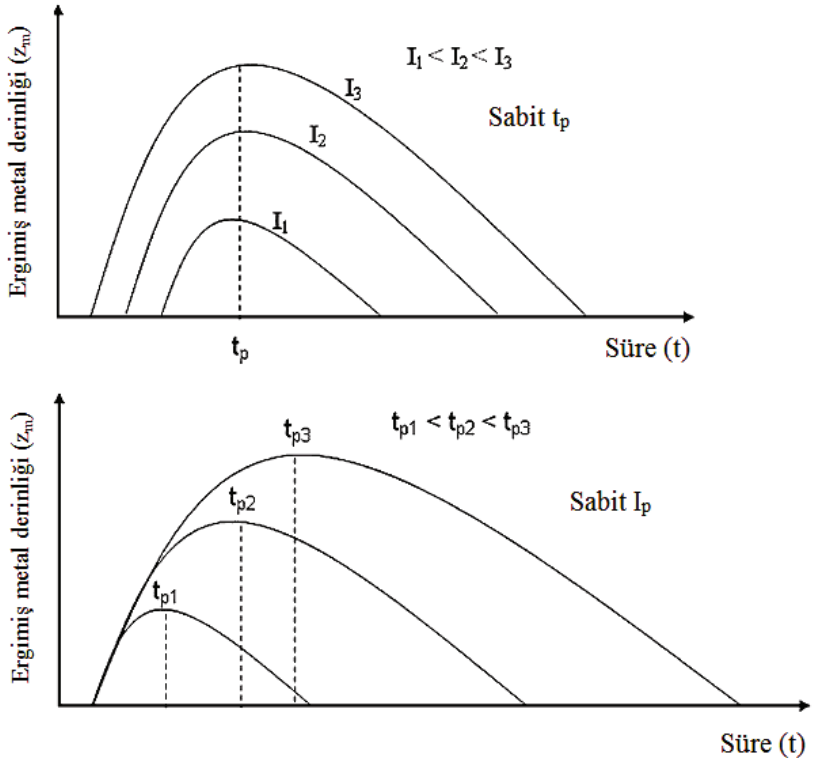
- Yüzeyde (z = 0); sıcaklık, artan etkileşim süresi ile artar ve t_p atım süresinde en yüksek seviyeye ulaşır ve sonra hızlı bir şekilde düşer.

- Yüzeyden belli bir derinlikte (z >0), sıcaklık artan etkileşim süresince artar, en yüksek seviyeye ulaşır ve sonra düşer. Bununla birlikte, en yüksek sıcaklığa t_p atım süresince tam olarak ulaşamaz bunun için daha uzun süre ($t>t_p$) gerekir. ($t>t_p$) süresi sonunda en yüksek sıcaklığa ulaşılır ki bu durumda sıcaklık, yüzeyden daha derin bir mesafeye ulaşılır (Dahotre ve Harimkar, 2008).



Şekil 3.4 Lazerle metal yüzey uygulamaları için sıcaklık – zaman ilişkisi (Bakır malzeme için) (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Şekil 3.5'de lazer metal etkileşimi sırasında ergime derinliğindeki değişimler görülmektedir. Sabit bir atım süresi boyunca artan güçle birlikte ergimiş metal derinliği artan güçle birlikte artar. Başka bir durumda, sabit güçte ergimiş metal derinliği artan atım süresiyle artar (Dahotre ve Harimkar, 2008).

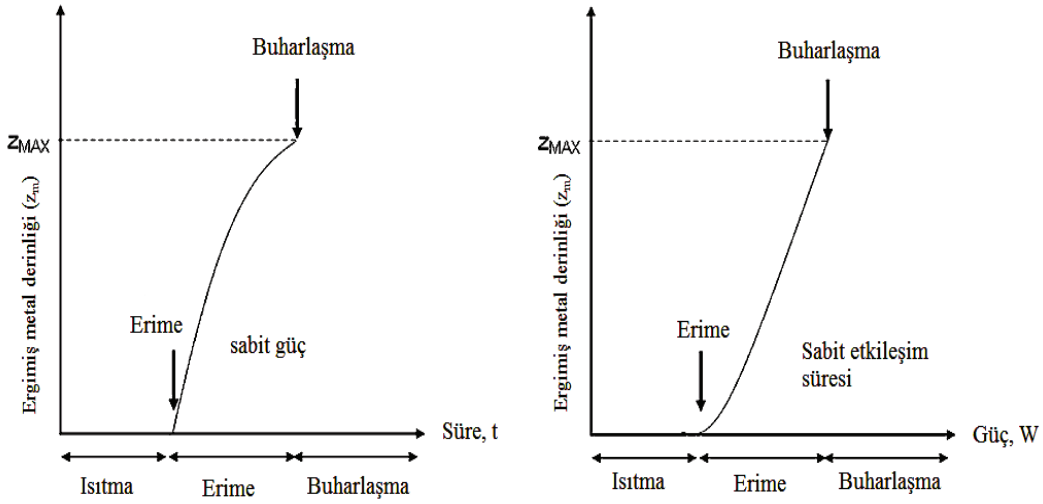


Şekil 3.5 Lazer – metal etkileşiminde ergime derinliğindeki değişim (Dahotre ve Harimkar, 2008).

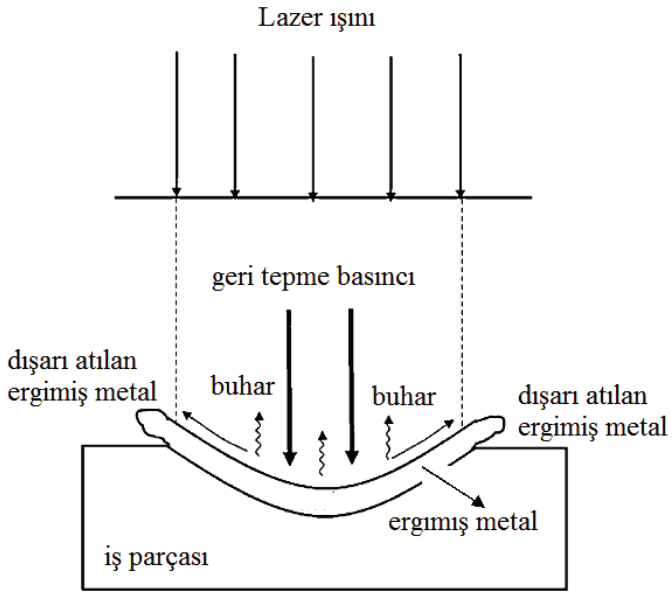
Ergimiş metal derinliği artan güç yoğunlu ve süreyle artmaz. Çünkü ergime bölgesindeki sıcaklık değişimleri özellikle maksimum sıcaklıkta ergimenin sürekliliğine izin vermez. Yüzey sıcaklığı kaynama sıcaklığına ulaştığında ergime derinliği maksimuma ulaşır. Güçteki artış yada atım süresindeki artış, ergime derinliğinde daha fazla artış olmadan metalin buharlaşmasını sağlar. Metal yüzeyinde buharlaşma başlar başlamaz, lazer etkileşimi devam ederse sıvı – buhar fazının etkisiyle ergimiş metal ortamdan uzaklaştırılır (Bkz. Şekil 3.6) (Dahotre ve Harimkar, 2008).

Şekil 3.7, lazer – metal etkileşimi sırasında metal kaldırma prosesinde ergimiş metalin uzaklaştırılması ve buharlaşma olayının şematik gösterimi görülmektedir. Lazerle iş parçası yüzeyinden malzeme kaldırma işleminde gerçekleşen iki proseste (eritme ve buharlaştırma), düşük güçte eritme olayı daha baskın bir etki gösterirken, yüksek güçte de buharlaştırma etkisi baskındır.

Bununla birlikte artan güçle birlikte ergimiş metal, lazer ışının oluşturduğu oyuktan dışarı atılır ve bu olay bir noktaya kadar artarak devam eder ancak sonra azalır. Bu süreçte güçteki artış buharlaşan metal miktarını da arttırmaktadır. Durağan olmayan koşullar altında, geri tepme basıncının etkisiyle dışarı atılan ergimiş metal tabakasının kalınlığı azalır. Artan güçle birlikte geri tepme basıncı artar ve sonuçta daha ince bir ergimiş tabaka kalınlığı oluşur (Dahotre ve Harimkar, 2008).



Şekil 3.6 Lazer – metal etkileşiminde ergime derinliğinin süre ve güçle birlikte değişimi (Dahotre ve Harimkar, 2008).



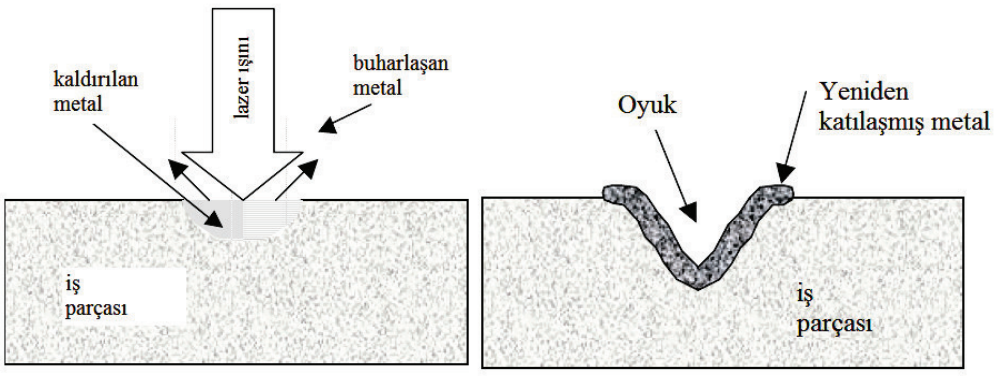
Şekil 3.7 Lazer – metal etkileşimi sırasında metal kaldırma prosesinde ergimiş metalin uzaklaştırılması ve buharlaşma olayı (Dahotre ve Harimkar, 2008).

4. LAZER OYMA

Lazer oyma genel bir ifade ile bir metal yada metal dışı malzemenin yüzeyinden ısı etkisiyle metal kaldırma tekniğidir. Lazer delme ve lazer markalama, oyma başlığı altında değerlendirilebilen lazerle işleme teknikleridir. Lazerle oyma tekniği, klasik geleneksel imalat yöntemlerinde frezeleme ve delmeye eşdeğer bir yöntem olup temel farklılığı kesici takım olarak yüksek yoğunlukta bir lazer ışının kullanılmasıdır. Temassız bir işlem olması ve kesici bir takım kullanılmaması işlenen yüzeyde takım kaynaklı problemleri elimine etmektedir. Bununla birlikte işlenmesi zor metaller ve dar toleranslara sahip karmaşık geometriler hassas bir şekilde işlenebilmektedir.

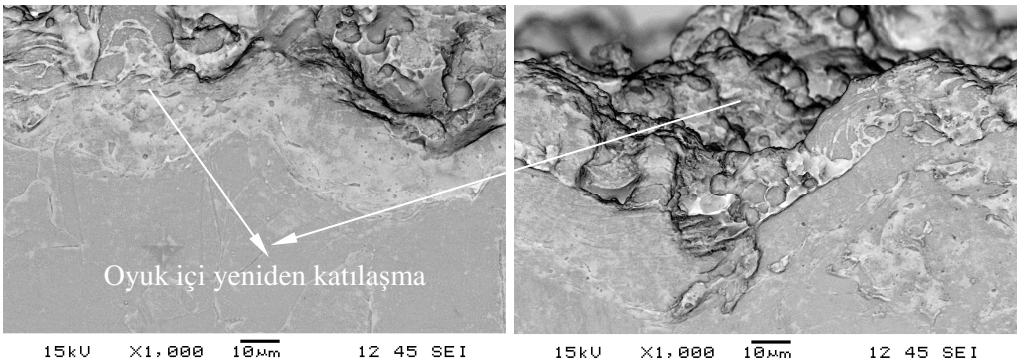
Lazer ışını ile yapılan tüm endüstriyel uygulamalarda, metal yüzeyine ışın yardımıyla ısı aktarımı söz konusudur. Sabit bir odak mesafesinden metal yüzeyine gönderilen yüksek yoğunluktaki bir lazer ışınının metal ile etkileşimi sonrasında ısı enerjisine dönüşmesi ile etkileşim bölgesinde belli miktardaki metal, erime ve buharlaşma yoluyla yüzeyden uzaklaştırılır. Proses çok hızlı bir şekilde gerçekleşir. Lazer oyma sırasında meydana gelen fiziksel olaylar Şekil 3.2'de görülmektedir.

Lazer oyma işlemi üç aşamada gerçekleşir. İlk olarak, hedef geometride lazer ışının absorbsiyonu ile ince bir tabaka eritilir. İkinci aşamada, lazer ışının metalle etkileşim süresi boyunca etkileşim bölgesinde erimiş metal havuzu oluşur ve bu havuzun sıcaklığı çok hızlı bir şekilde buharlaşma sıcaklığına ulaşır. Son aşamada buhar yayılma yoluyla yüzeyden uzaklaşır ve sonuçta ergimiş metal havuzu geri tepme basıncının etkisiyle radyal olarak oyuktan dışarı doğru atılır. Bir kısım metal, oluşan havuzdan dışarı doğru kaçarken bir kısmı oyuğun duvarlarında tekrardan katılaşır (Bkz. Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Lazerle buharlaşma olayı (www.muc.miyachi.com, 2010)

Tekrar katılaşma durumu lazerle oyma, delme ve kesme gibi endüstriyel uygulamaların hepsinde görülmektedir ve bu çalışma kapsamında, bu yapı yeniden katılaşmış tabaka olarak isimlendirilmiştir. Oyuk içindeki ergimiş metal bir sonraki tarama işleminde ışınla temasa geçtiğinde sıcaklığı yüksek olduğu için ışından aktarılan ısıyı absorbe etme yeteneği de yüksektir. Oyuk içindeki ergimiş metalin yeniden katılaşma prosesi sonrasında oluşan yapıya ait (bu çalışmalar sonucunda işlenmiş yüzeyde meydana gelmiş) örnek bir görüntü Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 Lazer ışının metal malzemede meydana getirdiği oyuk içi katılaşma durumu

Lazer oyma, karmaşık bir prosestir. Prosese etki eden temel parametreler; lazer çıkış gücü, ışın odak mesafesi, ışının yüzeyi tarama (işleme) hızı, frekans, tarama aralığı, ışın çapı, tarama yönü ve malzemenin türü. Prosesi optimize etmek için bu parametrelerin proses performansı üzerindeki etkilerinin bilinmesi gerekmektedir. Aşağıda lazer oyma proseslerinde parametrelerinden en çok kullanılanlar açıklanmıştır.

4.1 Temel İşlem Parametreleri

4.1.1 Lazer çıkış gücü (Laser output power)

Lazer çıkış gücü, lazer ışının çıkış gücünü ifade etmektedir. Birimi Watt (W)'tır.

4.1.2 Lazer tarama hızı (Laser scan speed)

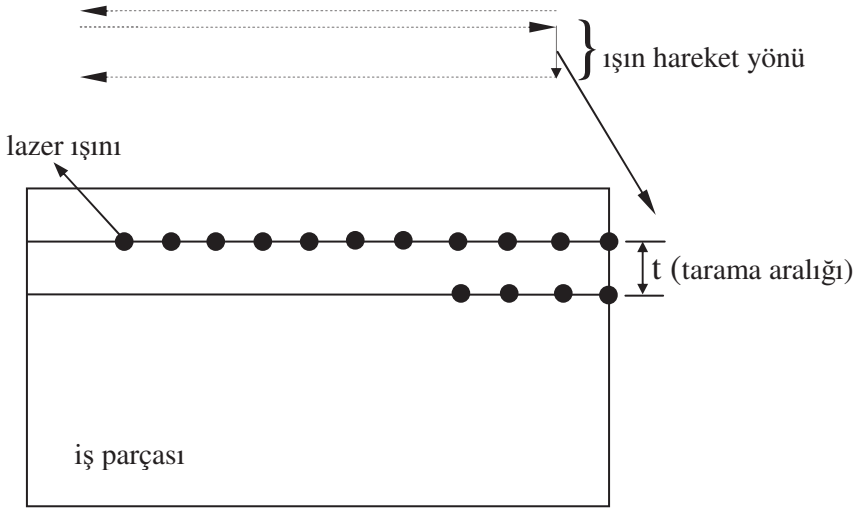
Lazer tarama hızı, lazer ışınının tanımlanan geometri üzerindeki hareket hızını ifade etmektedir. Birimi mm/s'dir. Tarama hızı yan yana ve alt alta iki ışın arasındaki mesafenin belirlenmesinde kullanılan en önemli parametredir.

4.1.3 Frekans (Frequency)

Birim zamandaki lazer ışının atım sayısını ifade eder. Birimi kHz'dir. Tarama hızı gibi yan yana ve alt alta iki ışın arasındaki mesafenin belirlenmesinde kullanılan diğer önemli parametrelidir.

4.1.4 Tarama aralığı (Fill spacing)

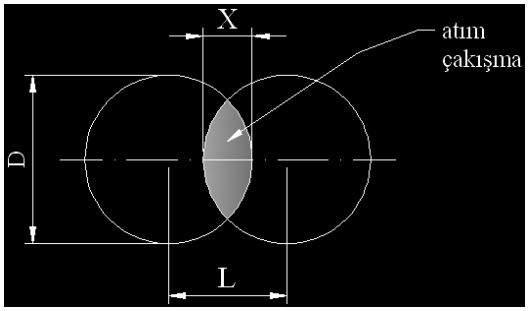
Tarama aralığı, lazer ışının geometri üzerindeki hareketleri sırasında alt alta yapılan ve önceki tarama yönüyle aynı yöndeki tarama sıraları arasındaki mesafedir. Şekil 4.3'de tarama alığı görülmektedir. Tarama aralığının birimi mm'dir.

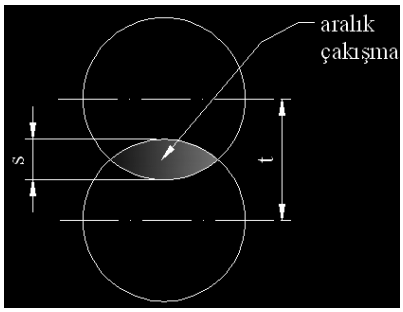


Şekil 4.3 Lazer ışının işleme yönü ve tarama aralığı

4.1.5 Işın çakışma oranı (Overlapping rate)

Işın çakışma miktarı, malzemedeki ısı ve enerji yoğunluğunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Lazer ışının hareketi sırasında ard arda gelen iki ışının çakışma durumuna ışın çakışması yada literatürdeki adıyla overlapping adı verilir. Işın çakışma durumu, atım çakışma (pulse overlapping) ve aralık çakışma (scan overlap) olarak iki grupta incelenmektedir. Şekil 4.4'de ışın çakışma durumları görülmektedir. Işın tarama hızı, frekans ve tarama aralığı yüzde çakışma oranlarının hesaplanmasında kullanılan parametrelerdir. Yüzde çakışma oranları (atım ve aralık çakışma) ile ilgili formüller aşağıdaki gibidir.





Şekil 4.4 Işın çakışma durumları

$$L=\frac{H}{F} \tag{4.1}$$

$$O_p(\%)=\frac{x}{d}=\left(1-\frac{L}{d}\right)\times 100 \tag{4.2}$$

$$O_p(\%)=\frac{x}{d}=\left(1-\frac{H}{F.d}\right)\times 100 \tag{4.3}$$

$$O_s(\%)=\frac{s}{d}=\left(1-\frac{t}{d}\right)\times 100 \tag{4.4}$$

Yukarıdaki denklemler için;

O_p = Atım çakışma oranı,

O_s = Aralık çakışma oranı,

L = Yan yana iki ışın arasındaki mesafe, (µm)

t = İki tarama yönü arasındaki mesafe (tarama aralığı), (µm)

d = Lazer ışın spot çapı, (µm)

H = Işın tarama hızı, (mm/s)

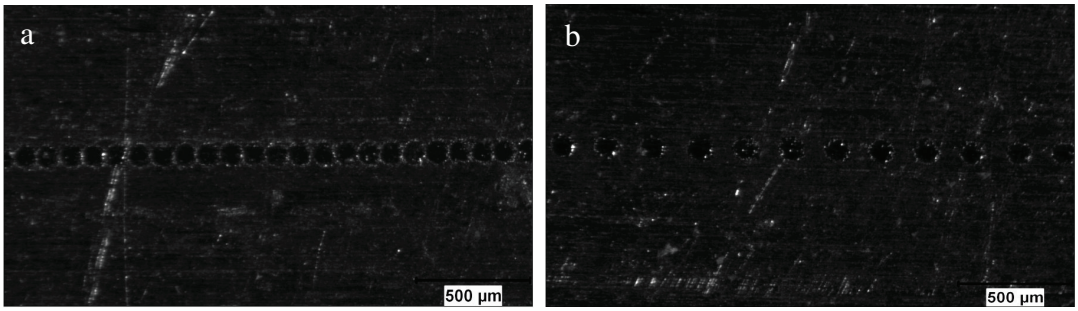
F = Frekans, (kHz)

x = Işın tarama yönünde ard ard iki ışının çakışma mesafesi,

s = İki tarama yönü arasında alt alta gelen ışınların çakışma mesafesi

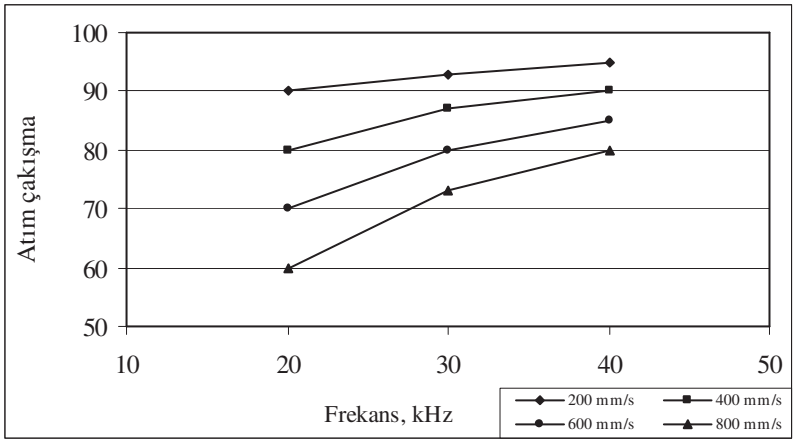
Atım çakışma miktarını tarama hızı, frekans ve ışın spot çapı belirlemektedir. Işın spot çapı sabit kalmak koşulu ile sabit frekansta artan hız çakışma oranını azaltmaktadır. Bununla birlikte, hızın sabit olması durumunda frekanstaki artma çakışma oranını arttırmaktadır. Şekil 4.5'de atım çakışma oranıyla ilgili örnek bir çalışma görülmektedir. Şekil 4.5a'da 2000mm/s hız ve 20kHz frekans için ortaya çıkan çakışma oranı 4000mm/s hız ve 20kHz frekans

için ortaya çıkan çakışma oranına göre daha büyüktür. Görüldüğü üzere, sabit frekansta artan tarama hızı çakışma oranını azaltmaktadır. Şekil 4.6'da sabit hızda artan frekansla birlikte artan atım çakışma oranı görülmektedir.



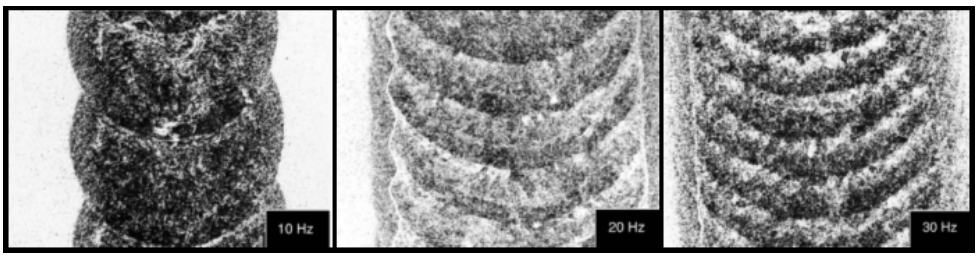
Şekil 4.5 Atım çakışma

a) H = 2000 mm/s, F = 20 kHz, b) H = 4000 mm/s, F = 20 kHz



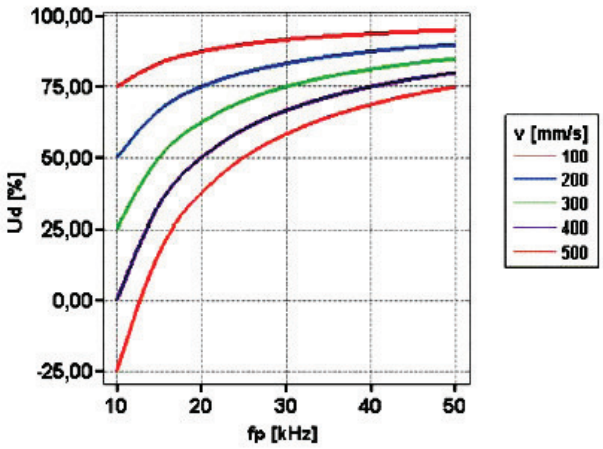
Şekil 4.6 Frekans ve hızın fonksiyonu olarak atım çakışma oranları

Kumar (2006), artan frekansla ve azalan tarama hızıyla çakışma oranının artacağını belirtmiştir. Şekil 4.7'de Ti-6Al-4V malzeme için yapılmış bir çalışmada atım çakışma oranları görülmektedir. Sabit hızda artan frekansla birlikte çakışma oranının arttığı görülmektedir. Yasa and Kruth'da (2010) benzer bir sonuca ulaşmışlardır.



Şekil 4.7 Işın çakışma durumları, Kumar (2006)

Şekil 4.8'de görüldüğü gibi sabit hızda artan frekans çakışma oranında artmaya sebep olmuştur (Kaldos et al., 2004).

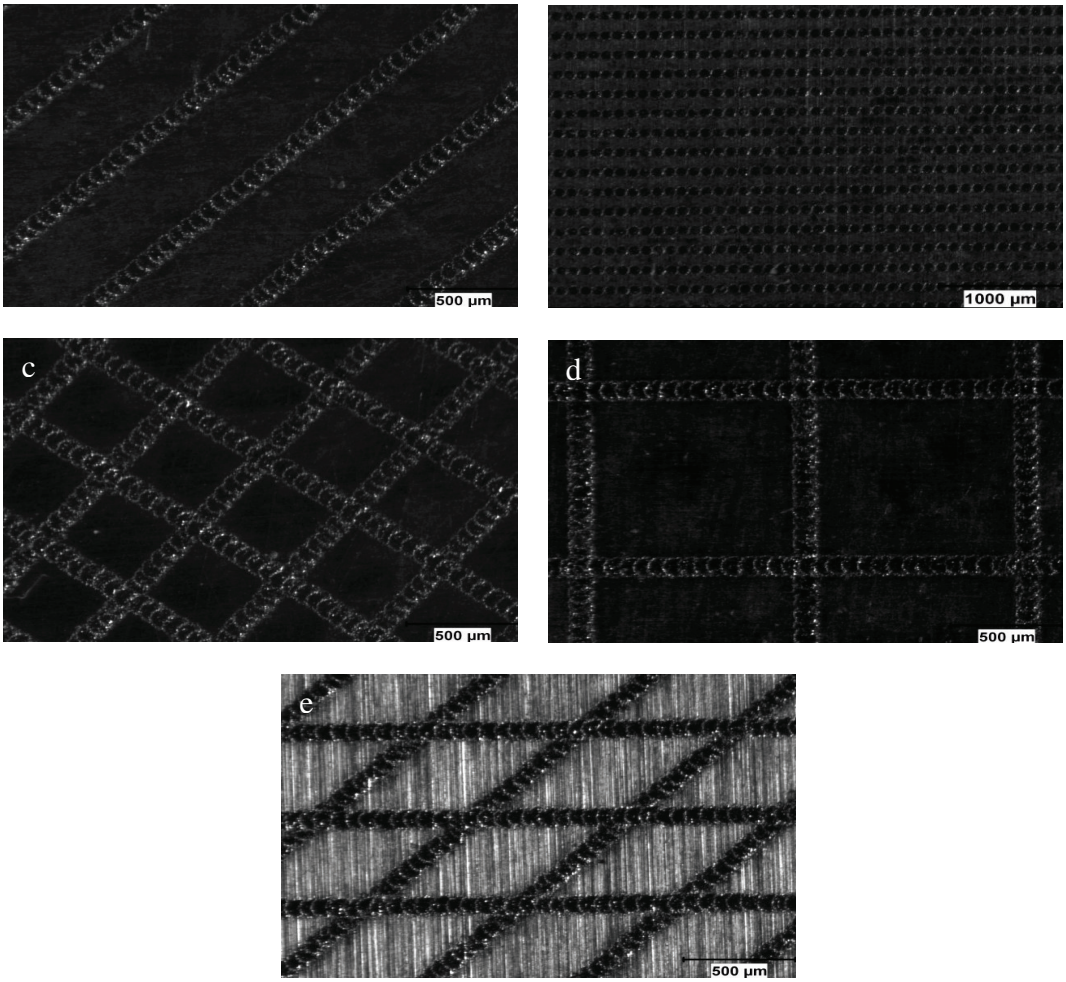


Şekil 4.8 Işın çakışma oranları (ışın spot çapı =40µm). (Kaldos vd., 2004).

Çakışma oranları birbirinden bağımsız olmasına rağmen ikisinin de lazerle oyma işlemindeki etkisi birim alandaki enerji yani ısı girdisini arttırmaktır. Atım çakışma oranın ısı girdisindeki etkisi aralık çakışma oranına göre daha yüksektir. Atım çakışma oranı, tarama oranı ve frekansla değişim gösterdiği için proses parametrelerinden daha fazla etkilenmektedir. Her iki çakışma oranının artması ısı girdisinde önemli artış sağladığından oyma işleminde etkili faktörlerdir. Ancak aralık çakışma sabit kalsa bile atım çakışma oranındaki değişim tek başına oyma derinliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu sebepten derin oymaya yönelik yapılacak bir işlemde her iki çakışma oranın arttırılması olumlu sonuçlar verecektir. Wendland et al. (2005), yaptıkları lazerle oyma çalışmasında çakışma oranının birim alandaki ısı girdisi için önemli olduğunu ve artan çakışma oranın birim alandaki ısı girdisini arttırdığını ancak artan çakışma miktarının yüzey kalitesini kötüleştirdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca ilk ışının atımından sonra diğer ışınının metalle teması sırasında metalin ilk atıma göre sıcak durumda olduğunu ve böylece, metal sıcaklığının ergime sıcaklığının üstüne çok hızlı bir şekilde ulaşılacağını tespit etmişlerdir.

4.1.6 Işın tarama yönü

Işın tarama yönü, ışının hareket yönünü ifade etmektedir. Tarama yönünde herhangi bir sınırlama olmaksızın 0°-360° arasındaki açılarda tarama yapılabilmektedir. Şekil 4.9'da farklı tarama yönleri örnekleri görülmektedir ve bu çalışma kapsamında şekilde görülen tarama yönlerinin etkileri araştırılmıştır.



Şekil 4.9 Işın tarama yön örnekleri

(a) 45°, (b) 0°, (c) 45°/-45°, (d) 0°/90°, (e) 0°/45°,

Literatür taramasında sadece bir çalışmada ışın tarama yönünün etkisiyle ilgili bir araştırma yapıldığı görülmüştür. Yasa and Kruth (2010), tarama yönün yüzey pürüzlülüğünde etkili olduğunu ancak oyma derinliğinin tarama yönünden bağımsız olduğunu tespit etmişlerdir.

4.2 Lazer İşlem Parametrelerinin Lazer – Metal Etkileşimindeki Rolleri

Lazerle yapılan yüzey sertleştirme, delme, oyma ve markalama gibi uygulamalarda bazı temel formüller kullanılmaktadır. Denklem 4.5-7, bu temel formülleri göstermektedir.

$$t_i = \frac{D}{H} \tag{4.5}$$

$$P_d = \frac{P}{A} \tag{4.6}$$

$$E_p = P_d.t_i \;\Rightarrow\; E_p = \frac{P.D}{A.H} \tag{4.7}$$

Burada,

P = Lazer çıkış gücü, (W)

P_d = Malzemeye uygulanan (odak alanındaki) güç yoğunluğu, (W/mm^2)

t = Etkileşim süresi, (s)

D = Işın spot çapı, (mm)

V = Işın tarama hızı, (mm/s)

E_p = Darbe enerjisi (J)

A = lazer spot çapının kapladığı alan (mm^2)

Denklem 4.5, lazer ışınıyla metal arasındaki etkileşim süresiyle, metale aktarılan enerji yoğunluğu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Işın çapı sabit kalmak koşulu ile tarama hızı arttıkça ışının metalle etkileşim süresi azalmaktadır. Etkileşim süresindeki azalma lazerden metale aktarılan ısı miktarında azalma meydana getirir. Metal yüzeyinde oyma sağlayacak ısı girdisi için gerekli enerjiye etki eden faktörler denklem 4.7'de görülmektedir. Lazer spot çapı sabit kalmak koşulu ile birim alandaki enerji girdisi güç ve hızın bir fonksiyonudur.

Lazer çıkış gücü sabit kalmak koşuluyla frekanstaki artış tepe gücünü azaltmaktadır. Tepe gücü anlık güçtür yani atım anındaki güçtür. Tepe gücündeki azalma sonucu malzemeyi buharlaştıracak kadar güç elde edilemeyebilir. Dolayısıyla frekansın belli bir değerinden sonra oyma yerine yüzeyde ergime sonucu katılaşma ile birlikte kabartı elde edilebilir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Lazerle derin oyma deneysel çalışmaları beş aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- Deney parametrelerinin seçilmesi,
- Dört temel parametrenin etkisinin ve farklı yüzey işleme yönlerinin etkisinin belirlenmesi için uygun deney düzeninin kurulması,
- Deney düzenine uygun olarak dört farklı malzemenin lazerle oyulma işlemleri,
- Deney sonuçlarının analiz edilmesi,
- En iyi yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için seçilen parametrelerden oluşturulan deney düzenine göre parametrelerin mikro yapıda ve sertlikte meydana getirdiği değişimlerin tespit edilmesi

Bu amaçlara uygun olarak deneysel uygulamaların kapsamını oluşturan aşamalar aşağıdaki başlıklarla açıklanmıştır.

5.1 Lazer Derin Oyma Parametrelerinin Seçimi

Lazer derin oyma işlemi için yapılan ön çalışmalara göre yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin olduğu düşünülen parametreler sırasıyla lazer çıkış gücü, ışın tarama hızı, frekans ve tarama aralığıdır. Her bir parametrenin farklı değerlerinin etkisinin tespitine yönelik yapılacak deneysel çalışmalar tam faktöriyel deney düzenine göre oluşturulmuştur. AISI H13 sıcak iş takım çeliği, AISI 316 paslanmaz çelik ve AA 7075 alüminyum alaşımı için temel parametre etkisinin tespitine yönelik olarak deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler ve değerleri Çizelge 5.1'de listelenmiştir. Çizelgedeki değerler ön çalışmalardan elde edilen verilere göre seçilmiştir. Bu malzeme grupları için yüzey işleme yönünün etkisinin kontrolüne yönelik seçilen parametreler ve değerleri ise Çizelge 5.2'de listelenmiştir. Bununla birlikte oyma çalışmalarında kullanılan diğer bir malzeme çeşidi de, Tungsten Karbürdür. Tungsten Karbür malzemeye uygulanacak oyma işleminde temel parametre etkisinin kontrolü için yapılan ön çalışmalara göre belirlenen parametreler ve değerleri, Çizelge 5.3'de ve yüzey işleme yönünün etkisinin kontrolü için seçilen parametreler ve değerleri Çizelge 5.4'de listelenmiştir.

Çizelge 5.1 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 için lazer derin oyma işlem parametreleri

Parametreler	Sembol - Birim	Seviyeler			
		1	2	3	4
Etkin güç	G - W	18	24	30	-
Frekans	F - kHz	20	30	40	-
Hız	H - mm/s	200	400	600	800
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	0,04	-

Çizelge 5.2 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 için yüzey işlem yönü parametreleri

Parametreler	Sembol / Birim	Değerler				
Tarama yönü	TY – (°)	45º	0º	45º-0º	45º/45º	90º/0º
Tarama hızı	H - mm/s	200	400	800	-	-
Frekans	F - kHz	20	30	40	-	-
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	0,04	-	-

Çizelge 5.3 Tungsten Karbür için lazer derin oyma temel işlem parametreleri

Parametreler	Sembol - Birim	Değerler	
Etkin güç	G - W	18	30
Tarama hızı	H - mm/s	200	400
Frekans	F - kHz	20	30
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03

Çizelge 5.4 Tungsten Karbür için yüzey işlem yönü parametreleri

Parametreler	Sembol / Birim	Değerler				
Tarama yönü	TY - (°)	45º	0º	45º-0º	45º/45º	90º/0º
Tarama hızı	H - mm/s	200	400	-	-	-
Frekans	F - kHz	20	30	-	-	-
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	-	-	-

Temel parametrelerin etkilerinin tespitine yönelik olarak Çizelge 5.1'de listelenen parametreler ve değerleri için 4^1x3^3 tam faktöriyel deney düzeni kullanılarak toplam 108 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni kurulmuştur ve deneysel çalışmalar bu deney düzenine göre gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.3'de listelenen Tungsten Karbür'e ait parametre ve değerleri için 2^4 tam faktöriyel deney düzeni kullanılarak toplam 16 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni kurulmuştur.

İşlem yönünün etkilerinin tespitine yönelik olarak Çizelge 5.2'de gösterilen parametreler ve değerleri için 5^1x3^3 tam faktöriyel deney düzeni kullanılarak

toplam 135 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni oluşturulmuştur. Tungsten Karbür için 5^1x2^3 tam faktöriyel deney düzeni kullanılarak toplam 40 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni kurulmuştur.

5.2 Lazer Derin Oyma İşlem Performansları

Bu çalışmada işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü ve oyma derinliği lazer derin oyma işleminin işlem performansı ve çıktısı olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte işlenmiş yüzeye dik kesitte sertlik ölçümleri de yapılmıştır.

5.3 Malzeme ve Metot

5.3.1 Deneylerde kullanılan malzemeler

Deneysel çalışmalar kapsamında dört farklı malzeme çeşidi kullanılmıştır. Bu malzemelere ait spektral analiz sonuçları Çizelge 5.5, 6, 7 ve 8'de gösterilmiştir. Oyma işlemleri için lama şeklindeki iş parçaları 40mmx100mmx20mm ölçülerinde hazırlanmış ve tüm yüzeyleri taşlanmıştır.

Çizelge 5.5 AISI H13 takım çeliğinin kimyasal analiz sonucu (%Wt.)

Malzeme	C	Cr	Mn	Mo	V	Si	Fe
AISI H13	0,3%	5,54%	0,36%	1,33%	0,4%	1%	kalan

Çizelge 5.6 AISI 316 paslanmaz çeliğinin kimyasal analiz sonucu (%Wt.)

Malzeme	C	Cr	Mn	Mo	Ni	Si	Fe
AISI 316	0,056%	18,72%	1,54%	2,08%	9,85%	0,61%	kalan

Çizelge 5.7 AA 7075 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonucu (%Wt.)

Malzeme	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Zn	Al
AA 7075	0,298%	0,277%	0,087%	2,902%	0,287%	0,075%	kalan

Çizelge 5.8 Tungsten Karbür'ün kimyasal analiz sonucu (%, Wt)

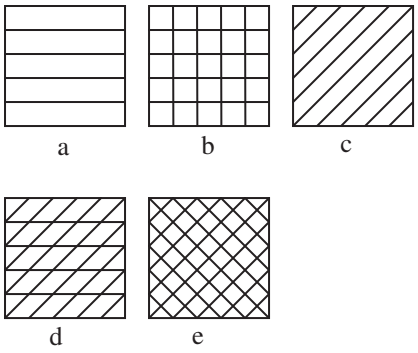
Malzeme	C	Ti	Co	W
Tungsten Karbür (WC-Co)	3,506%	1,967%	5,359%	89,168%

5.3.2 Lazerle işleme (tarama) metodu

Lazer derin oyma deneysel çalışmaları kapsamında maksimum çıkış gücü 30W olan ve Şekil 5.1'de gösterilen fiber lazer markalama cihazı kullanılmıştır. Lazer ışını, en yüksek güç yoğunluğunun elde edildiği 175mm'lik odak mesafesinde iş parçasına odaklandırılmıştır. Bu odak mesafesinde lazer ışının iş parçasında oluşturduğu spot çapı 100µm'dir ve dalga boyu 1064µm. Deneysel çalışmalar kapsamında işleme geometrisi olarak 10mmx10mm ölçülerinde karesel bir alan seçilmiştir. Deneysel çalışmaların birinci aşamasında işlem yönü olarak 0° seçilmiş ve seçilen alan bu yönde 20 kez taranmıştır. İkinci aşamada ise farklı tarama yönleri ile aynı boyuttaki karesel alan yine 20 kez seçilen yönde taranmıştır. Şekil 5.2'de lazer ışının metal yüzeyini tarama yönleri gösterilmektedir. Lazerle oyma işlemleri oda koşullarında herhangi bir koruyucu gaz kullanılmadan gerçekleştirilmiştir.



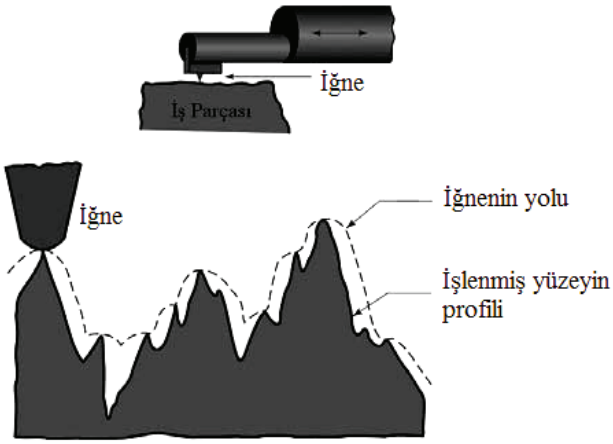
Şekil 5.1 Lazer derin oyma işleminde kullanılan lazer markalama cihazı



Şekil 5.2 Lazer derin oyma işleminde kullanılan tarama yönleri
(a) 0°, (b) 90°/0°, (c) 45°, (d) 0°/45°, (e) 45°/-45°

5.3.3 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan yüzey pürüzlülük cihazının çalışma prensibinin temelini pürüzlülüğü algılayıcı elmas sivri bir ucun yüzey profili üzerinde tanımlanan ölçüm mesafesi boyunca hareketi oluşturmaktadır. Elmas uç ile yüzeydeki girinti ve çıkıntılar tespit edilir ve ucun dik yöndeki hareketleri bir algılayıcı aracılığıyla elektriksel sinyallere dönüştürülür. Bu sinyaller, seçilen pürüzlük parametrelerinin hesaplanmasını sağlar. Yüzeydeki bu girinti ve çıkıntıların sayısal karşılıkları dijital olarak ekrana yansıtılabildiği gibi belirtilen ölçüm parametrelerine göre grafiksel olarak da çıktı şeklinde alınabilmektedir. Şekil 5.3'de elmas sivri ucun (iğne) profil üzerindeki hareket yolu görülmektedir.



Şekil 5.3 Yüzey pürüzlülük profili ve elmas ucun hareket yönü
(http://w3.balıkesir.edu.tr/~tkerem/yuzeypuruzluluguanlatim.pdf, Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

Yüzey pürüzlülüğünde kullanılan temel parametreleri Ra, Rz, Rt ve Rq'dır. Bu parametreler arasında yüzey pürüzlülüğünün rakamsal tarifi için endüstriyel uygulamalarda en çok Ra ve Rz kullanılmaktadır. Ra, aritmetik ortalamayı; Rz, 5 tane en yüksek 5 tane en alçak noktanın ortalamasını; Rt, tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamını; Rq, aritmetik ortalama sapmaların karekökünü ifade etmektedir.

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülük ölçümleri için Ege Üniversitesi Makine Mühendisliğindeki Mitotoya SJ 301 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu 0,8mm ve ölçüm uzunluğu 5mm olarak seçilmiştir. Pürüzlülük parametreleri olarak Ra ve Rz parametreleri kaydedilmiştir. İş parçasının işlenmiş yüzeyinde beş farklı noktadan işleme yönüne zıt yönde pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır ve beş ölçümün ortalaması nihai yüzey pürüzlülük (Ra) değeri olarak kullanılmıştır.

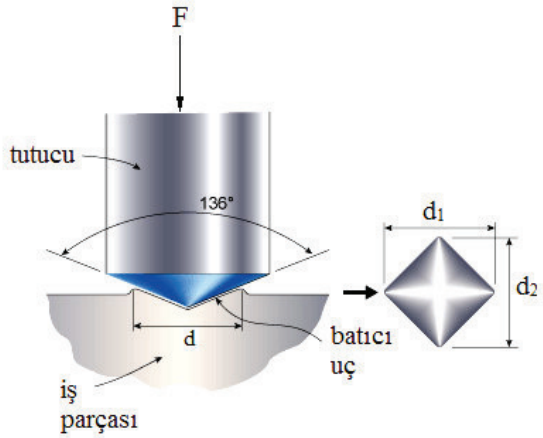
5.3.4 Oyma derinliği ölçümleri

AISI H13, AISI 316 ve Tungsten Karbür iş parçalarının oyma derinliği ölçümleri için Mitotoya SJ 301 yüzey pürüzlülüğü cihazı kullanılmıştır. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu ve ölçüm uzunluğu 0,8 mm ve 4 mm olarak seçilmiştir. Pürüzlülük parametreleri olar Ry ve Rz parametreleri kaydedilmiştir. İş parçasının beş farklı bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması nihai oyma derinliği değeri olarak kullanılmıştır.

AA 7075 iş parçalarının oyma derinliği ölçümleri için Mitotoya dijital komparatör kullanılmıştır. İş parçasının beş farklı bölgesinden alınan ölçümlerin ortalaması nihai oyma derinliği değeri olarak kullanılmıştır.

5.3.5 Sertlik ölçümleri

Vickers sertlik ölçme yöntemi, sertliği ölçülecek malzeme parçasının yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki elmas bir ucun belirli bir yük altında batırılması, bir süre beklenilmesi ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesinden ibarettir. Şekil 5.4'de Vickers sertlik ölçümlerinde kullanılan uç geometrisi görülmektedir.



Şekil 5.4 Vickers sertlik ölçümlerinde kullanılan uç geometrisi
(http://www.twi.co.uk/content/jk74.html, Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

$$d^2 = d_1^2 + d_2^2 \tag{5.1}$$

$$HV = 1.854\frac{F}{d^2} \tag{5.2}$$

Burada,

HV = Vickers sertlik değeri

F = Uygulanan yük

d = Metal yüzeyinde oluşan dörtgensel izin köşegen uzunluğu



Şekil 5.5 Vickers sertlik ölçüm cihazı (HMV-2 Shimatzu)

Lazerle derin oyma çalışmalarında işlenmiş yüzeylerin dik kesitlerinde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler için Ege Üniversitesi Makine

Mühendisliğindeki HMV-2 Shimatzu marka Vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.5'de kullanılan sertlik cihazı görülmektedir. AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 iş parçalarında sertlik dağılımının belirlenebilmesi için numunelerin işlenmiş yüzeyinin dik kesitine 10gr.'lık bir yük 10sn süreyle uygulanmıştır. Tungsten Karbür için 50gr'lık bir yük 10s süreyle uygulanmıştır. Tüm malzeme çeşitleri için oyulmuş bölgenin hemen alt yüzeyinden itibaren bir doğru boyunca 25 μm aralıklarla toplam sekiz ölçüm alınmıştır. Sertlik sonuçları mesafenin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir.

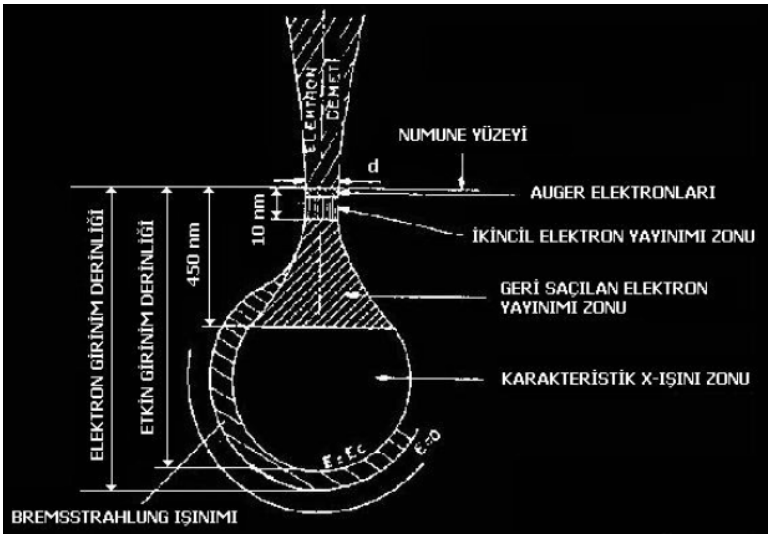
5.3.6 Elektron mikroskobisi

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM, scanning electron microspe) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir.

Taramalı Elektron Mikroskobu Optik Kolon, Numune Hücresi ve Görüntüleme Sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10-4 Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır. Görüntü sisteminde, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler, bunların sinyal çoğaltıcıları ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler bulunmaktadır.

Yüksek voltaj altında ivmelendirilen elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim sonuçları Şekil 5.6' da şematik olarak gösterilmektedir. Bu girişim hacmi su damlası görünümü olarak tanımlanır. Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile elastik olmayan girişimi sonucunda düşük enerjili Auger elektronları oluşur. Bu elektronlar numune yüzeyi

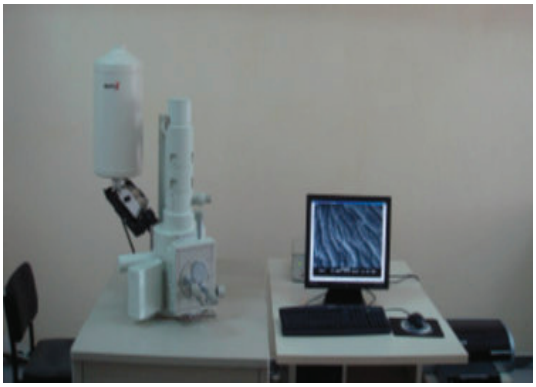
hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron (seconder electrons) olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır.



Şekil 5.6 Elektron demeti ile numune arasındaki etkileşim (host.nigde.edu.tr/.../ELEKTRON%20TARAMALI%20MİKROSKOP%20_SEM.pdf, Erişim tarihi: 2 Haziran 2010).

Numune üzerine odaklanan elektron demeti, numune atomları ile ayrıca elastik girişimlerde de bulunabilir. Bu girişimlerde demet elektronları, numune atomlarının çekirdeğinin çekim kuvveti ile saptırılarak numune yüzeyinden geri saçılmaktadır. Bu elektronlar geri saçılmış (back scattered) elektronlar olarak tanımlanır ve objektif merceğin altında yer alan özel üç adet silikon dedektörde (A, B, C) toplanarak görüntü oluşumunda kullanılır. Böyle bir görüntü geri saçılmış (back scattered) elektron görüntüsü olarak tanımlanır. Geri saçılmış elektron miktarı, numunenin atom numarasıyla orantılıdır. Bu nedenle geri saçılmış elektron görüntüsü özellikle çok fazlı sistemlerde atom numarası farkına dayanan kontrast içerir. Geri saçılmış elektron dedektöründe sinyaller toplandığında (A+B) atom numarası kontrastına bağlı kompozisyon görüntüsü elde edilir. (host.nigde.edu.tr/.../ELEKTRON%20TARAMALI%20MİKROSKOP%20_SEM.pdf, Erişim tarihi: 2 Haziran 2010).

Lazerle işlenmiş yüzeylerin dik kesitlerinde yapılan SEM incelemeleri, Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji Mühendisliğindeki JSM-6060 JEOL Model Taramalı Elektron Mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.7'de cihazın fotoğrafı görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için seçilen değerlerden bir kaçı için SEM incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 5.7 Deneylerde kullanılan SEM analiz cihazı

5.3.7 Optik mikroskobi incelemeleri

Mikroyapı incelemeleri Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji Mühendisliğindeki Olympus marka dijital kameralı optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.8'de cihazın fotoğrafı görülmektedir. Mikroyapı incelemesinde, işlemiş yüzeyin dik kesiti standart parlatma işlemlerinden geçirildikten sonra sırasıyla dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için seçilen optimal değerler için kesit yüzeyinden farklı büyütmelerde fotoğraflar alınmıştır.



Şekil 5.8 Deneylerde kullanılan optik mikroskop cihazı

5.3.8 XRD analizleri

XRD (X Ray diffraction) analiz çalışmaları Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji Mühendisliğindeki Rigaku D/Max–2200/PC Model XRD cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9'da cihazın fotoğrafı görülmektedir. Analizler lazerle oyulmuş yüzeylere ve herhangi bir lazer işlemine tabi tutulmamış yüzeylere ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 5.9 Deneylerde kullanılan XRD cihazı

6. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Lazer kaynaklı imalat işlemlerinin hepsi temelde aynı prensipte gerçekleşmektedir. Lazer ışınının metalle etkileşimi sırasında yüzeyde meydana getirdiği termal etkiler sonucunda (ısıtma, ergime yada buharlaştırma) oyma, delme, kesme, kaynak markalama ve yüzey sertleştirme gibi uygulamalar gerçekleştirilir ve bu uygulamalar için iş parçası malzemesi, işlem parametreleri ve kullanılan lazer sistemleri farklılıklar göstermektedir. Endüstriyel uygulamalardan kesme, kaynak ve delme gibi temel uygulamalar için lazer cihazlarındaki yazılımlarla parametreler malzeme çeşidine bağlı olarak sistemden seçilebilmektedir. Buna karşın oymaya yönelik uygulamalar daha farklı detaylar (işlenecek geometri, kullanılan lazer sistemi, oyma derinliği, yüzey özellikleri vb.) içerdiğinden parametreler yapılacak uygulamaya göre farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada fiber lazer markalama sistemi kullanılarak yapılan oyma işleminde parametrelerin oyma derinliğine ve yüzey pürüzlülüğüne (proses çıktıları) etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler bir istatistik programı kullanılarak matematiksel olarak formülize edilerek tahmini bir model oluşturulmuştur. Tahmini modelden elde edilen sonuçlar ile gerçek uygulamalar arasındaki ilişki belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametrelerden hız için seçilen değerlerden biri ve oluşturulan matematiksel modelin test edilmesinde kullanılmıştır. Bununla birlikte en yüksek oyma derinliği ve en düşük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin seçilen değerleri için işlenmiş yüzeyin kesitinde sertlik ölçümleri yapılarak mesafeye bağlı sertlik değişimi araştırılmıştır. Bu kapsamda deneysel çalışma sonuçları aşağıdaki işlem sırasına göre gruplandırılarak incelendirilmiştir.

- Deney sonuçlarının noktasal ve grafiksel incelemesi. Noktasal ve grafiksel gösterimler istatistik programı kullanılarak elde edilmiştir. Bunlar, parametrelerin her bir değerine karşılık gelen ölçüm sonucunun noktasal dağılımı ve parametrelerin her bir değeri için ölçülen deney sonuçlarının ortalamalarına göre çizilen grafiklerdir.

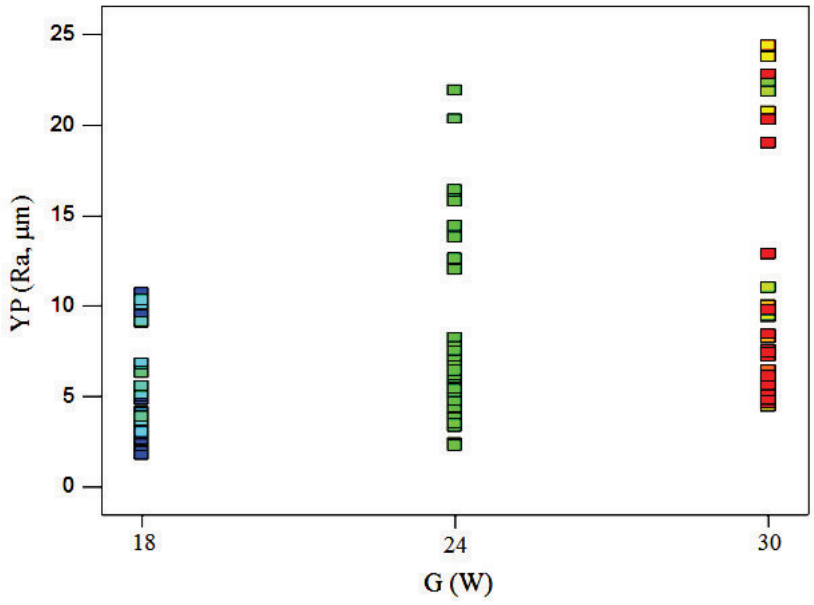
- En yüksek oyma derinliği ve en düşük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin değerlerinin tespit edilmesi ve bu değerlere göre mikroyapı ve sertlik değişimi araştırılması.

6.1 AISI H13 Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının Analizi

Şekil 6.1 – 4'de ve Şekil 6.6 – 9'da sırasıyla temel işlem parametrelerinin her bir değerinde ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.5'de ve Şekil 6.10'da ise temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir. Şekil 6.11 – 14'de ve Şekil 6.16 – 19'da sırasıyla yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliğine etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.15'de ve Şekil 6.20'de ise yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir.

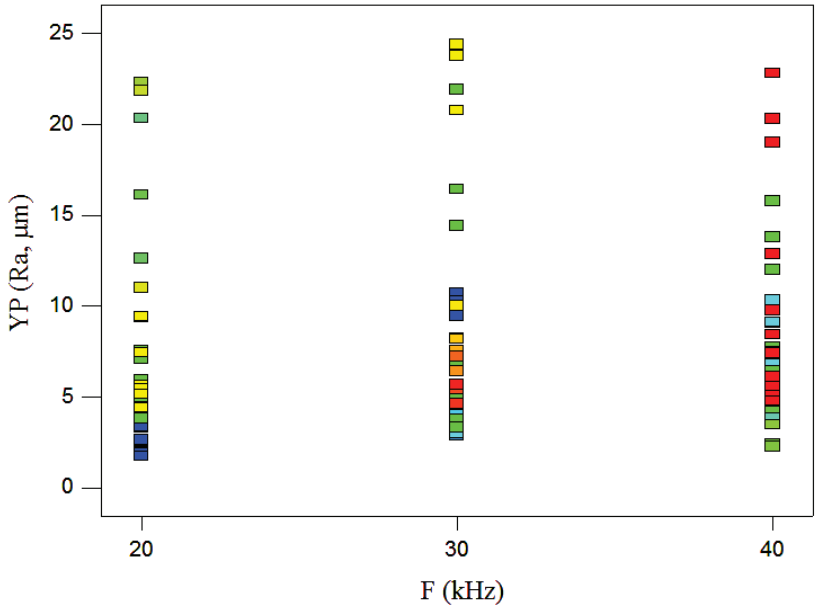
6.1.1 AISI H13 takım çeliği için temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.1, AISI H13 çeliği için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Şekilde noktasal dağılımın eğilimi incelendiğinde, güçteki artışın yüzey pürüzlülüğü değerini arttırdığı görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri 30W etkin güçte ölçülmüş ve gücün bu değeri için ölçülen en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri sırasıyla 24,41µm ve 4,41µm'dir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 18W etkin güç değerinde ölçülmüş ve gücün bu değeri için ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 1,75µm'dir. Şekil 6.5, gücün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin grafiksel gösterimini göstermektedir ve grafikteki eğilim, güçteki artışın yüzey pürüzlülüğünü arttığını göstermektedir.



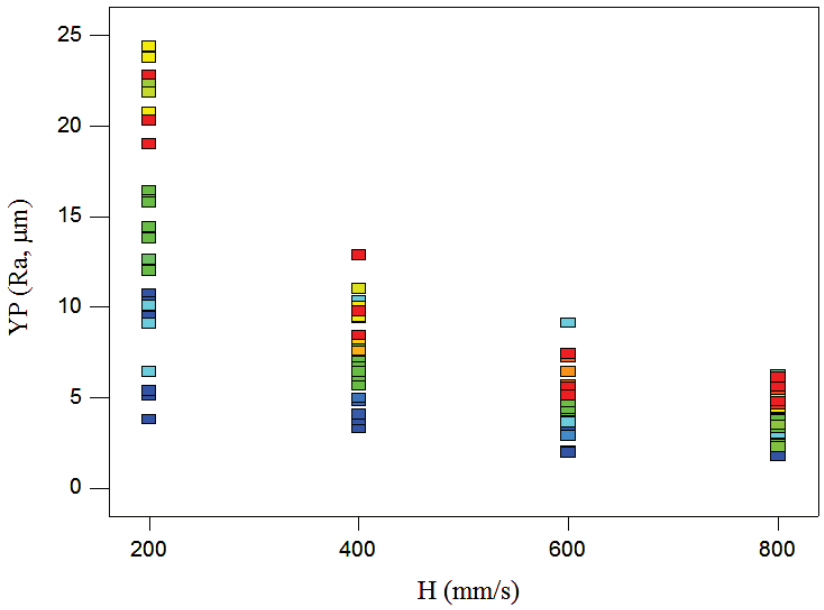
Şekil 6.1 AISI H13 takım çeliği için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.2, AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Şekilde, ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerine ait noktasal dağılım ve eğilim frekansın yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrusal bir değişim yaratmadığını göstermektedir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri (24,41µm) 30kHz'deki frekansta ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri (1,75µm) ise 20kHz'deki frekansta ölçülmüştür. Noktaların dağılımı, 20kHz ile 30kHz arasında yüzey pürüzlülüğünde artışın ve 30kHz ile 40kHz arasında ise yüzey pürüzlülüğünde azalmanın meydana geldiğini göstermektedir. Şekil 6.5'deki grafiksel gösterime göre en düşük yüzey pürüzlülüğünün 20kHz'de ve en yüksek yüzey pürüzlülüğünün 40kHz'de meydana geldiği görülmektedir. Grafikte ayrıca 30kHz ve 40kHz'de arasında belirgin bir değişimin meydana gelmediği görülmektedir.



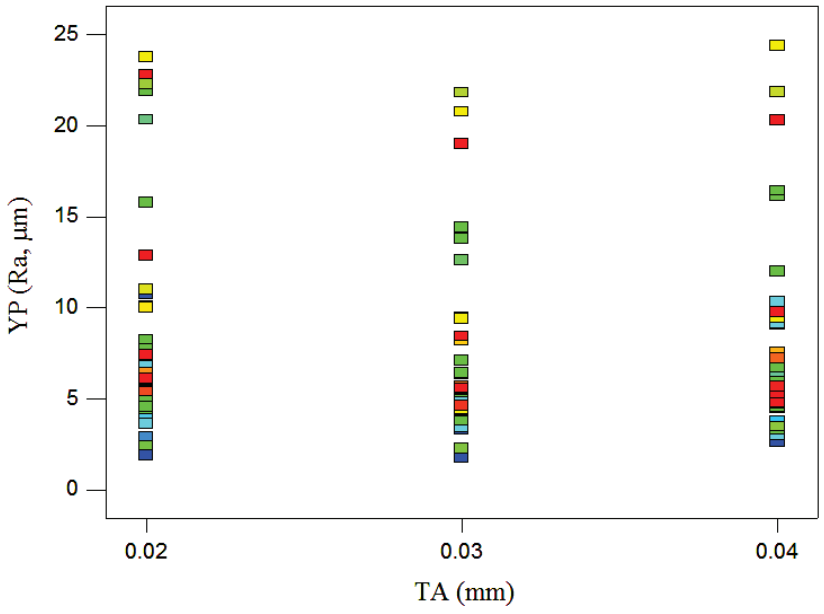
Şekil 6.2 AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.3, AISI H13 takım çeliği için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Noktaların dağılımındaki genel eğilime göre tarama hızındaki artış yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri 200 mm/s'de elde edilmiştir. 200mm/s'de ölçülen en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 24,41µm ve 3,79µm'dir. Bununla birlikte en düşük yüzey pürüzlülük değerleri 800 mm/s'de elde edilmiştir. 800mm/s'de ölçülen en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 6,26µm ve 1,89µm'dir. Şekil 6.5'de tarama hızının yüzey pürüzlüğüne etkisinin grafiksel gösterimi de hızdaki artışın yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana getirdiğini göstermektedir.



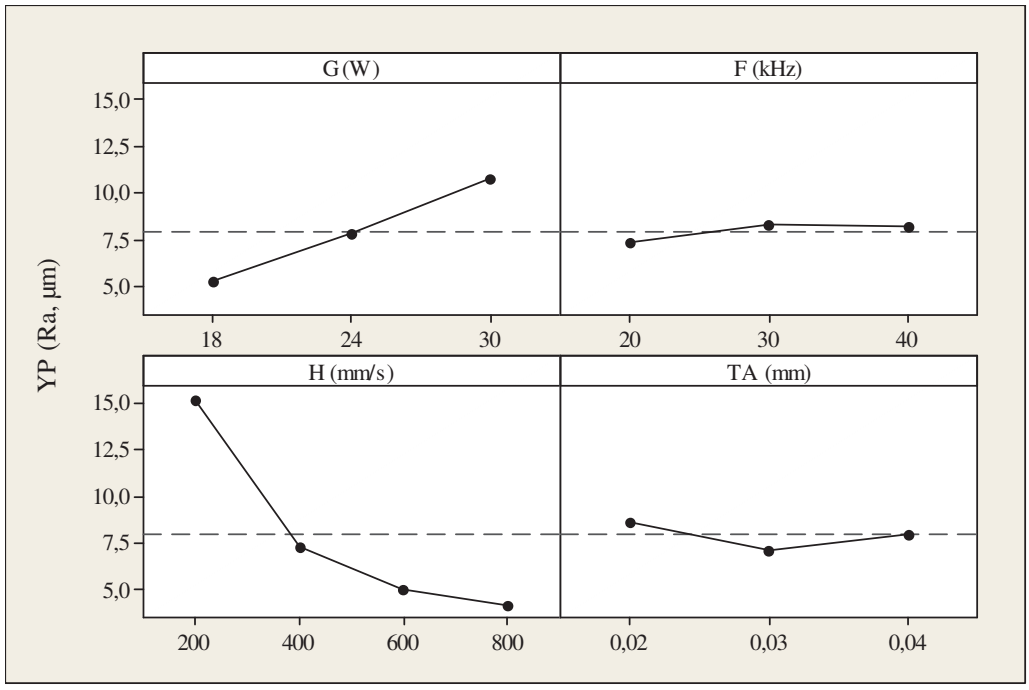
Şekil 6.3 AISI H13 takım çeliği için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.4, AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü (1,75µm) 0,03mm'deki tarama aralığında ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü (24,41µm) 0,04mm'deki tarama aralığında ölçülmüştür. Şekil 6.5'deki grafiksel gösterimdeki eğilim incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,03mm'de, en yüksek yüzey pürüzlülüğü ise 0,02mm'de tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün en yüksek değeri için ölçülen değerlerin noktasal gösterimi ve grafiksel gösterimi arasındaki fark çok büyük olmamakla birlikte grafiksel gösterimdeki sonucun farklılığı grafiğin ortalama değerlere göre çizilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.4 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal ve grafiksel gösteriminde görülmektedir ki, en düşük yüzey pürüzlülüğü gücün 18W, frekansın 20kHz, tarama hızının 800mm/s ve tarama aralığının 0,03mm olduğu şartlarda meydana gelmektedir. Bununla birlikte en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 30W, 30-40kHz, 200mm/s ve 0,02mm'deki deney koşullarında ölçülmüştür.



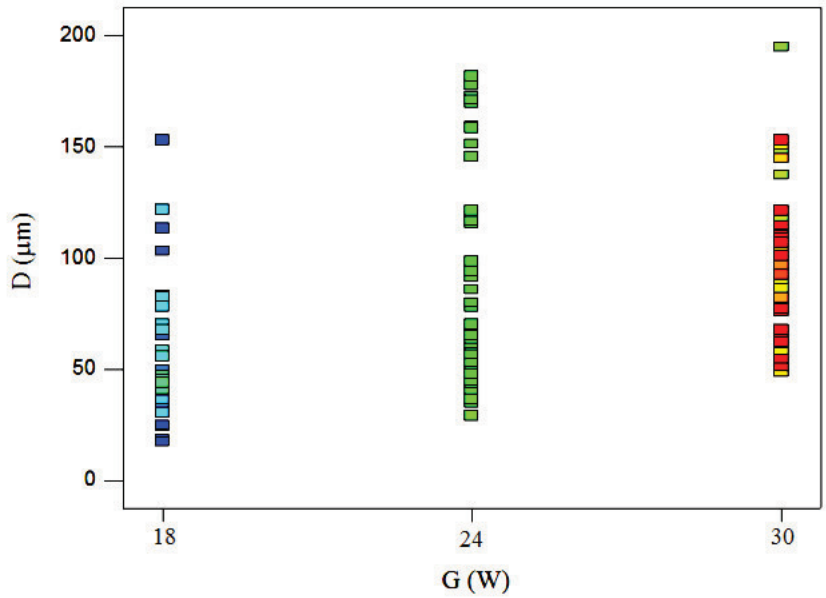
Şekil 6.5 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin grafiksel gösterimi

6.1.2 AISI H13 takım çeliği için temel işlem parametrelerinin oyma derinliğine etkisi

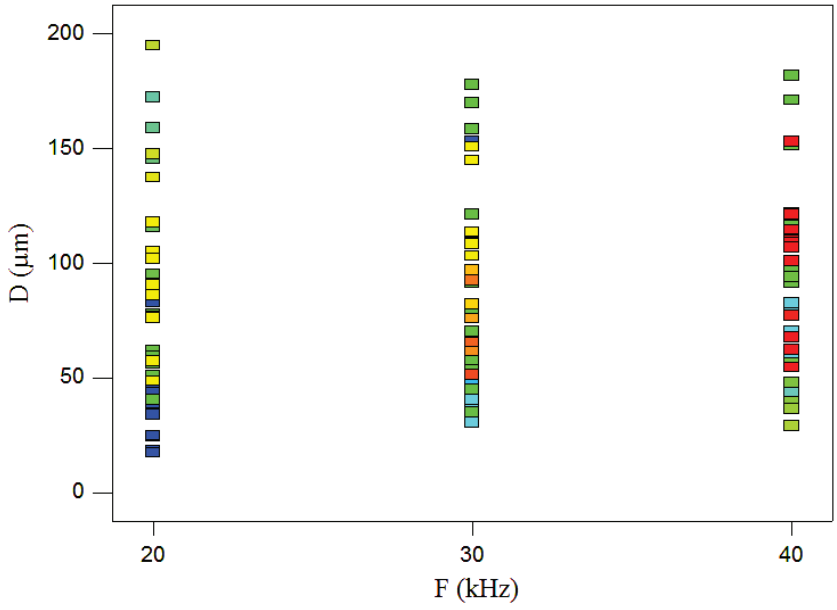
Şekil 6.6, AISI H13 takım çeliği için gücün oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Her bir güç değeri için noktaların dağılımı incelendiğinde artan gücün oyma derinliği değerini arttırdığı görülmektedir. En yüksek oyma derinliği değeri 30W etkin güçte ve en düşük oyma derinliği değeri 18W etkin güçte ölçülmüştür ve ölçülen değerler sırasıyla 195µm ve 17,41µm'dir. Şekil 6.10'da gücün oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir. Bu grafikteki eğilim de artan gücün oyma derinliğini arttırdığını göstermektedir.

Şekil 6.7, AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Ölçülen oyma derinliği değerlerinin noktasal dağılımı

incelendiğinde, en yüksek oyma derinliği değerleri 40kHz'de ölçülürken en düşük oyma derinliği değerleri 20kHz'de ölçülmüştür. Bununla birlikte grafiksel gösterimde genel eğilimin artan frekansla oyma derinliğinin artığı yönündedir. En yüksek oyma derinliği 195µm'dir ve bu değer 40kHz'de ölçülmüştür.



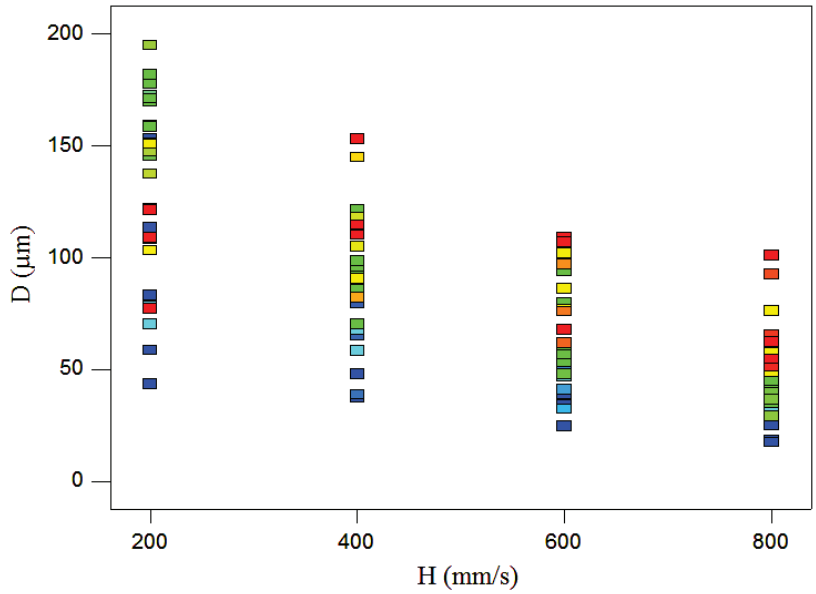
Şekil 6.6 AISI H13 takım çeliği için gücün oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.7 AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

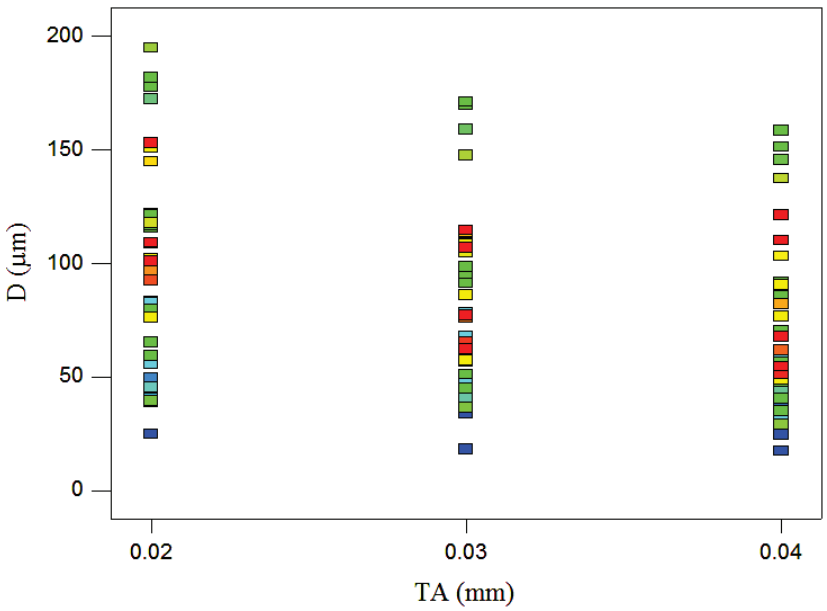
Şekil 6.8, AISI H13 takım çeliği için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Noktaların tarama hızlarındaki dağılımının eğilimi göstermiştir ki tarama hızı artığında oyma derinliği azalmaktadır. Benzer eğilim Şekil 6.10'daki oyma derinliğinin grafiksel gösteriminde de tespit edilmiştir. En

yüksek oyma derinliği (195µm) 200mm/s'de ve en düşük oyma derinliği (17,41µm) 800mm/'de ölçülmüştür.



Şekil 6.8 AISI H13 takım çeliği için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

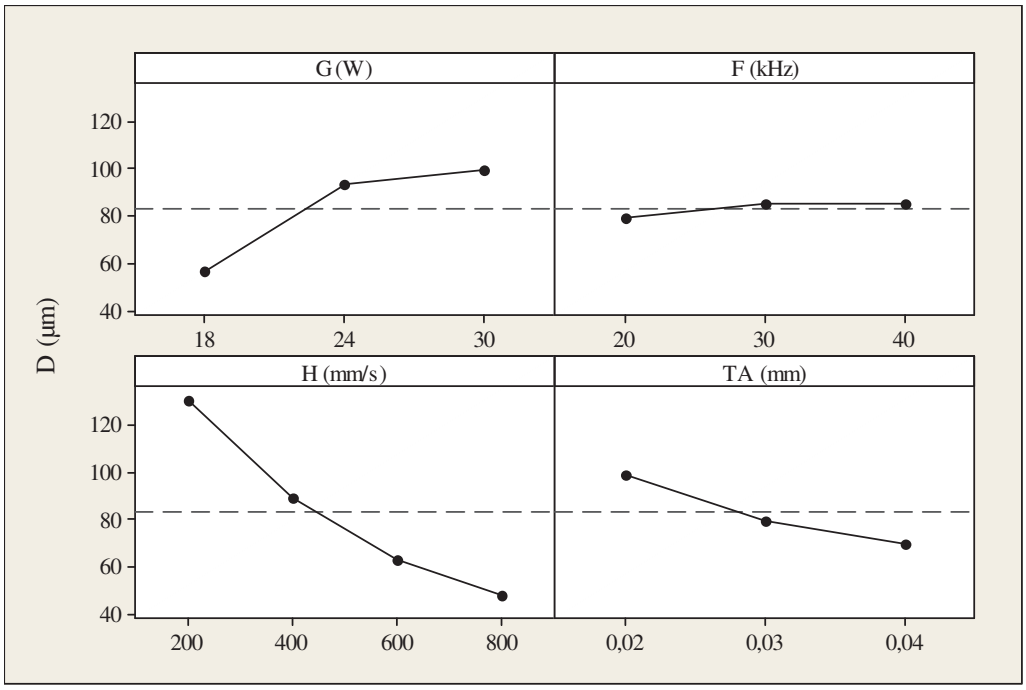
Şekil 6.9, AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Noktasal dağılımda, artan tarama aralığı ile oyma derinliğinin düştüğü görülmektedir. Şekil 6.10, tarama aralığındaki artışın oyma derinliğini azalttığını göstermektedir. Grafiksel ve noktasal gösterim aynı sonucu vermiştir.



Şekil 6.9 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi

En yüksek oyma derinliği (195µm) 0,02'de ve en düşük oyma derinliği (17,41µm) 0,04mm'de ölçülmüştür.

Parametrelerin oyma derinliğine etkisinin noktasal ve grafiksel gösteriminde görülmüştür ki, en yüksek oyma derinliği etkin gücün 30W, frekansın 40kHz, tarama hızının 200mm/s ve tarama aralığının 0,02mm olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte, en düşük oyma derinliği değeri 18W etkin güçte, 20kHz'deki frekansta, 800mm/s'lik hızda ve 0,04mm'deki tarama aralığındaki deney koşullarında elde edilmiştir

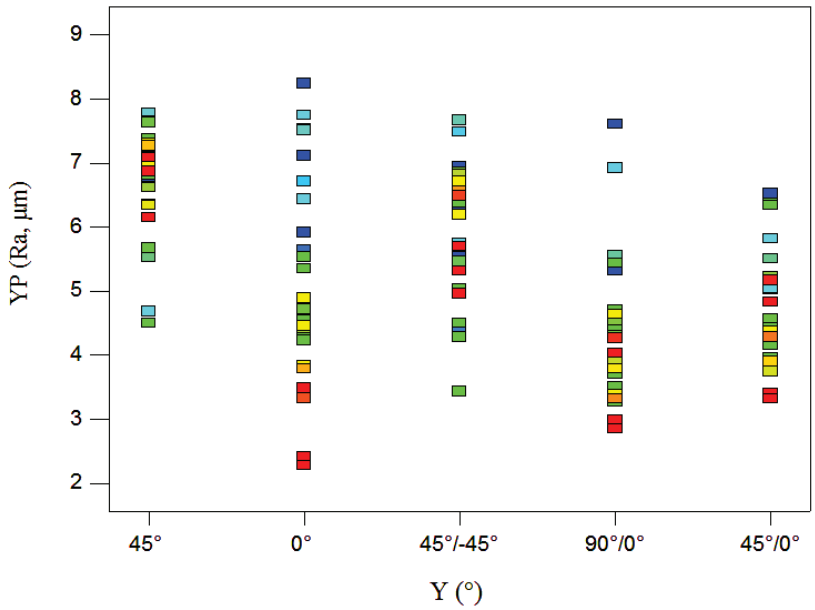


Şekil 6.10 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin oyma derinliğine (D) etkisinin grafiksel gösterimi

6.1.3 AISI H13 takım çeliği için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.11, AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönü için noktaların dağılımı incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri, 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değerler sırasıyla 2,28µm ve 8,24µm'dir. 0°'de ölçülen en yüksek yüzey pürüzlüğü dışında ikinci en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri 45°'de tespit edilmiştir ancak genel dağılımda 0°, 45° ve 90°'deki oyma işlemelerinde her bir yöndeki en yüksek

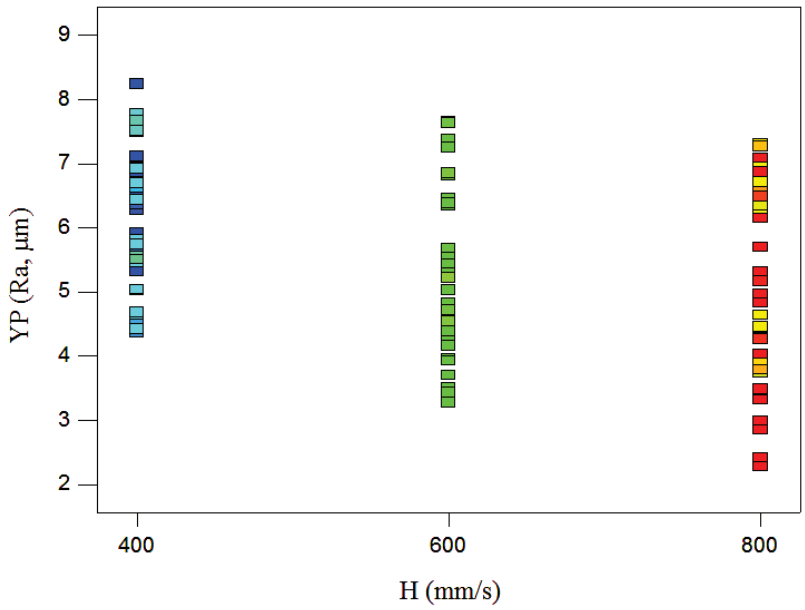
yüzey pürüzlülük değerleri birbirine çok yakın değerdedir. Şekil 6.15'deki grafiksel gösterime göre en yüksek yüzey pürüzlülüğü 45°'deki oyma işleminde ve en düşük yüzey pürüzlülüğü de 0°'deki oyma işleminde tespit edilmiştir. Noktasal gösterimle grafiksel gösterim arasındaki farklılık grafiksel gösterimin ortalamalara göre çizilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak hedef, en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edileceği koşulların sağlanması olduğu için 0°'de yapılacak oyma işlemi en iyi yüzeyi verecektir.



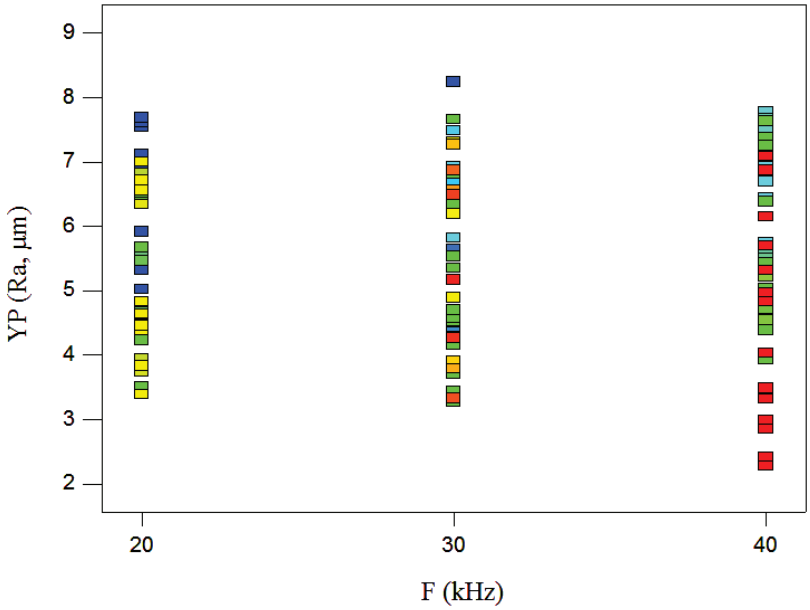
Şekil 6.11 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.12, AISI H13 takım çeliği için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Noktasal dağılımdaki eğilime göre artan tarama hızı, yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülüğü (2,28µm) ve en yüksek oyma derinliği değeri (8,24µm) sırasıyla 800mm/s'de ve 200mm/s'de ölçülmüştür. Tarama hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi, hem temel parametrelerin etkilerinin hem de işlem yönünün temel etkilerinin tespitine yönelik elde edilen sonuçlarla aynı cevabı vermiştir.

Şekil 6.13, AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Frekansın üç farklı değeri için noktaların dağılımı incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü 20kHz – 30kHz arasında artmış ve 30kHz – 40kHz arasında azalmıştır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü 30kHz'de tespit edilirken en düşük yüzey pürüzlülüğü 40kHz'de tespit edilmiştir.

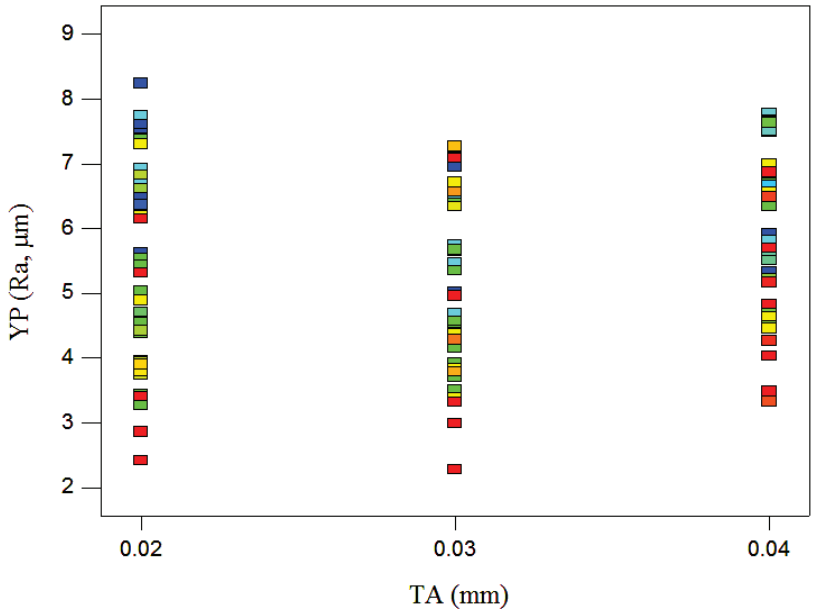


Şekil 6.12 AISI H13 takım çeliği için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

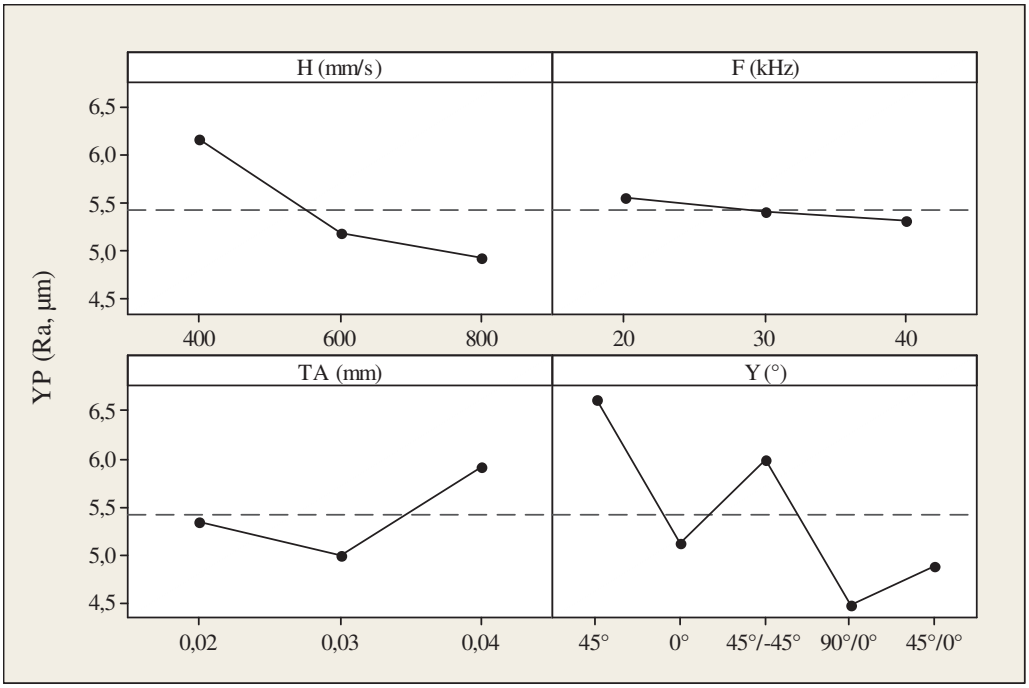


Şekil 6.13 AISI H13 takım çeliği için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.14 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 0,02mm'de ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri de 0,03mm'de ölçülmüştür. Bununla birlikte 0,02mm ve 0,03mm tarama aralıklarında ölçülen en düşük yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 2,42µm ve 2,28µm'dir ve görüldüğü gibi aralarındaki fark çok düşüktür.



Şekil 6.14 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

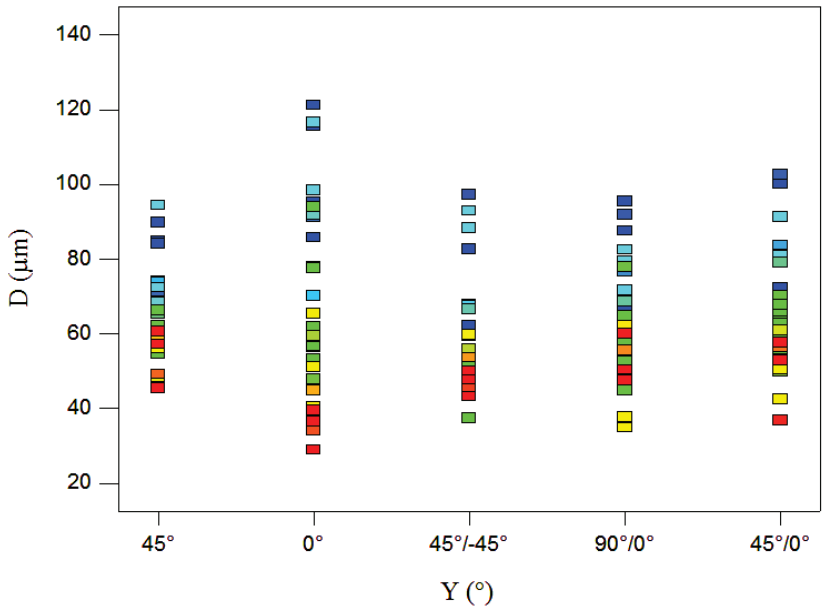


Şekil 6.15 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin grafiksel gösterimi

İşlem tarama yönünün oyulmuş alanın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal gösteriminde görülmüştür ki, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri tarama yönünün 0°, frekansın 40kHz, tarama hızının 200mm/s ve tarama aralığının 0,03mm olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 0°'deki işlem yönünde, 30kHz'deki frekansta, 400mm/s'deki hızda ve 0,02mm'deki tarama aralığının meydana getirdiği deney koşulunda ölçülmüştür.

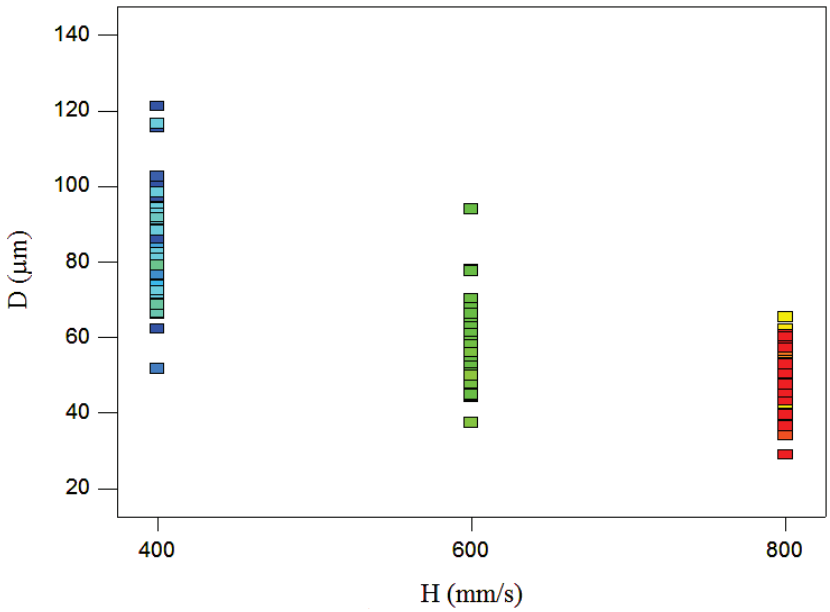
6.1.4 AISI H13 takım çeliği için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine etkisi

Şekil 6.16, AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönü için noktaların dağılımı incelendiğinde, en düşük oyma derinliği ve en yüksek oyma derinliği değerleri 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değerler sırasıyla 28,96µm ve 121,24µm'dir. Bununla birlikte, 0°'deki en yüksek oyma derinliği değeri hariç, 0°, 45° ve 45°/-45°'deki tarama yönleri için oyma derinliklerinin en yüksek değerleri birbirlerine çok yakındır. Şekil 6.20'deki grafiksel gösterimde en derin oyuğun 0°'de yapılan oyma işleminde mümkün olduğunu göstermektedir.



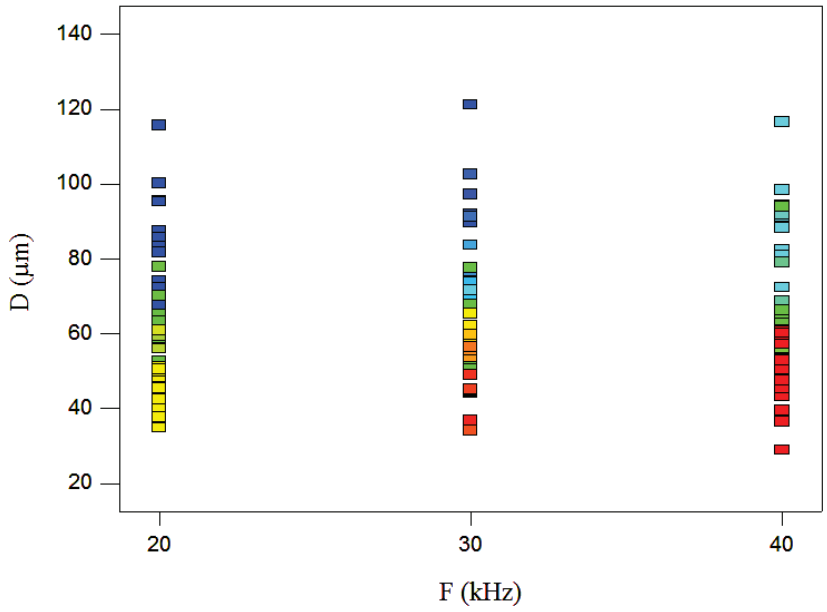
Şekil 6.16 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.17, AISI H13 takım çeliği için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Tarama hızının her bir değeri için noktasal dağılım, artan tarama hızıyla birlikte oyma derinliğinin azaldığını göstermektedir. Bu sonuç, temel parametrelerin etkisinin tespitinde elde edilen sonuçla benzerlik göstermektedir. Bu şartlarda ölçülen en yüksek derinlik değeri 121,24µm'dir ve bu değer 400mm/s'de ölçülmüştür.



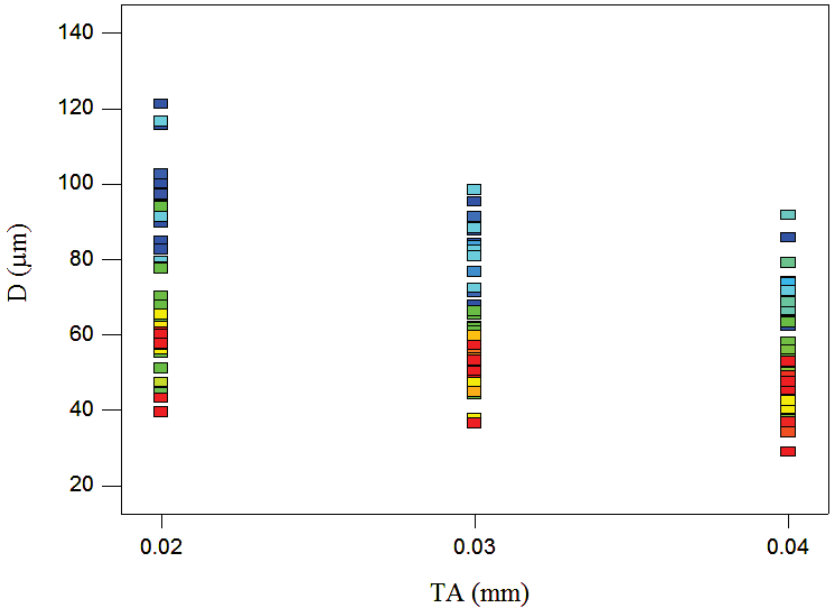
Şekil 6.17 AISI H13 takım çeliği için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.18, AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Frekansın her bir değeri için noktasal dağılımdaki eğilime göre, 20kHz – 30kHz arasında oyma derinliği artmış ve 30kHz – 40kHz arasında oyma derinliği azalmıştır. Frekans 30kHz'de iken ölçülen en derin oyuk 121,24µm değerindedir. Ancak noktasal dağılım incelendiğinde frekansın üç değeri için sadece bir adet derin oyuk elde edilmiştir. Bunun dışında her bir frekansın en yüksek ve en düşük değerleri neredeyse aynıdır. Bu sebepten frekansın oyma derinliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir.

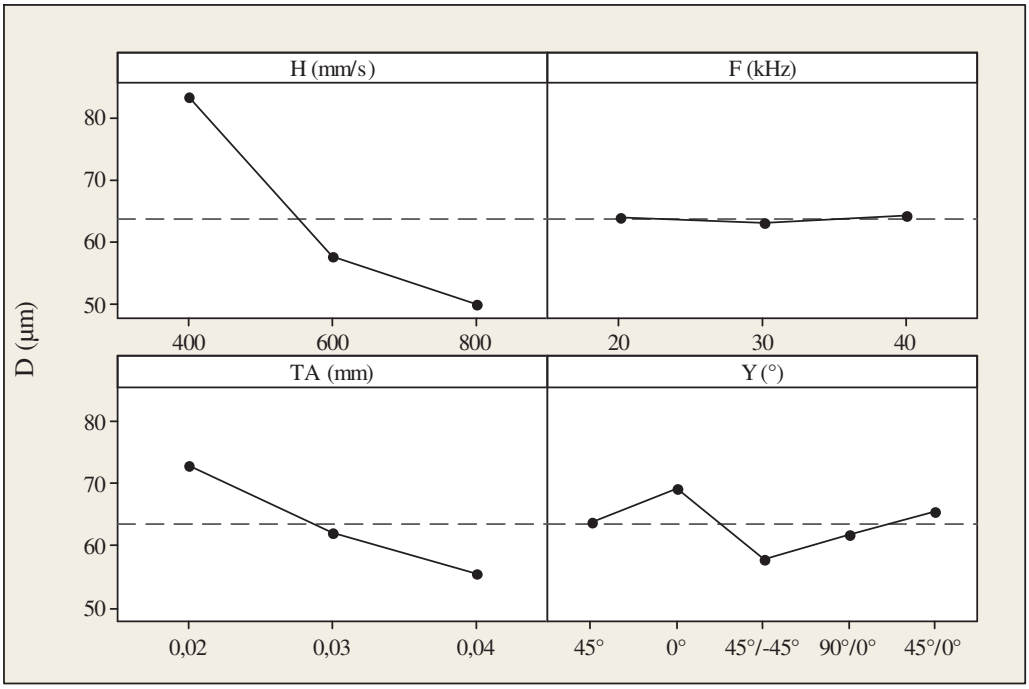


Şekil 6.18 AISI H13 takım çeliği için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.19, AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Noktaların dağılımına göre, artan tarama aralığı oyma derinliğini azaltmaktadır. Bununla birlikte, tarama aralığının 0,03mm ve 0,04mm'deki değerleri için elde edilen sonuçlar arasındaki değişim çok yüksek değildir. Hem noktasal gösterim hem de Şekil 6.20'deki grafiksel gösterime göre en derin oyuk 0,02mm'deki tarama aralığında meydana gelmiştir.



Şekil 6.19 AISI H13 takım çeliği için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.20 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi

İşlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin noktasal gösterimine göre, en yüksek oyma derinliği tarama yönünün 0°, tarama hızının 200mm/s, frekansın 30kHz ve tarama aralığının 0,02mm olduğu deney koşulunda meydana gelmektedir. Bununla birlikte en düşük oyma derinliği değeri 0°, 40kHz, 800mm/s ve 0,04mm'deki deney koşulunda tespit edilmiştir.

6.2 AISI 316 Paslanmaz Çelik İçin Deney Sonuçlarının Analizi

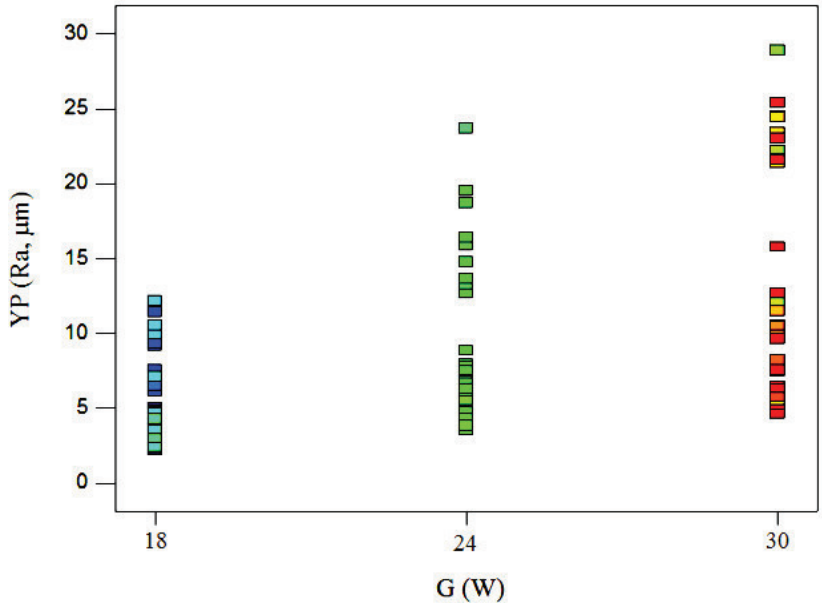
Şekil 6.21 – 24'de ve Şekil 6.26 – 29'da AISI 316 paslanmaz çelik için temel işlem parametrelerinin her bir değerinde ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.25'de ve Şekil 6.30'da ise temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir. Şekil 6.31 – 34'de ve Şekil 6.36 – 39'da yüzey işlem yönünün yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerine etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.35'de ve Şekil 6.40'da ise işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir.

6.2.1 AISI 316 paslanmaz çelik için temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.21'de AISI 316 çeliği için oyma parametrelerinden gücün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılımdaki eğilime göre, lazer çıkış gücündeki artma yüzey pürüzlülüğünde artış meydana getirmektedir. Etkin gücün 30W olduğu değerde yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir ki bu güçte yapılan oyma işleminde ölçülen en yüksek yüzey pürüzlük değeri 28,924µm'dir. Bununla birlikte en düşük yüzey pürüzlülük değeri etkin gücün 18W olduğu değerde elde edilmiştir ve bu güçteki en düşük yüzey pürüzlülük değeri 2,17 µm'dir. Şekil 6.25'de gücün yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafiksel gösterim de noktasal gösterimle aynı sonucu vermiştir.

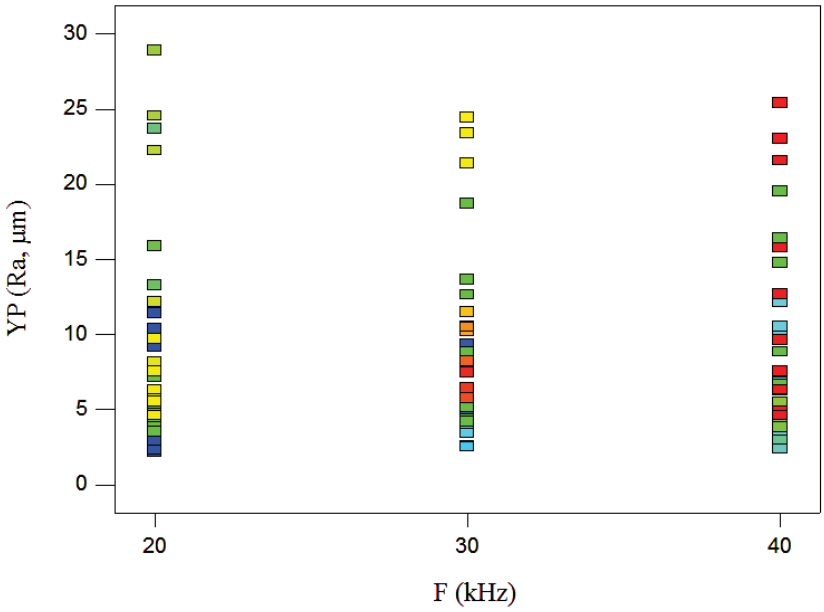
Şekil 6.22'de AISI 316 paslanmaz çelik için oyma parametrelerinden frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların her bir frekans değeri için dağılımı incelendiğinde en yüksek yüzey pürüzlülüğü 20kHz'de ölçülmüş olsa bile dağılımın genel eğilimi 20kHz ile 30kHz arasında yüzey pürüzlülüğünde büyük bir değişimin olmadığı buna karşın, 30kHz ve 40kHz arasında artan frekansla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı yönündedir. Şekil 6.25'deki grafiksel gösterimde de benzer bir eğilim tespit

edilmiştir. Bu sebepten frekansın yüzey pürüzlülüğünde meydana getirdiği etkinin 40kHz için daha belirgin olduğu ve en yüksek yüzey pürüzlülüğünün 40kHz'de elde edildiği söylenebilmektedir. Frekansın 40kHz'de meydana getirdiği en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 25,434µm'dir. Bununla birlikte 20kHz'de ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 24,57µm iken 30kHz'de ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 24,432µm'dir. Frekansın 20kHz'de ve 30kHz'de ölçülen en yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki fark 0,138µm'dir ve değişim %0,56'dır ki bu değer ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bununla birlikte, 20kHz'de ve 40kHz'de ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki fark 1,002µm'dir. Genel bir yaklaşımla frekansın en düşük ve en yüksek değeri için ölçülen yüzey pürüzlülükleri arasındaki fark çok büyük olmadığı için frekansın yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

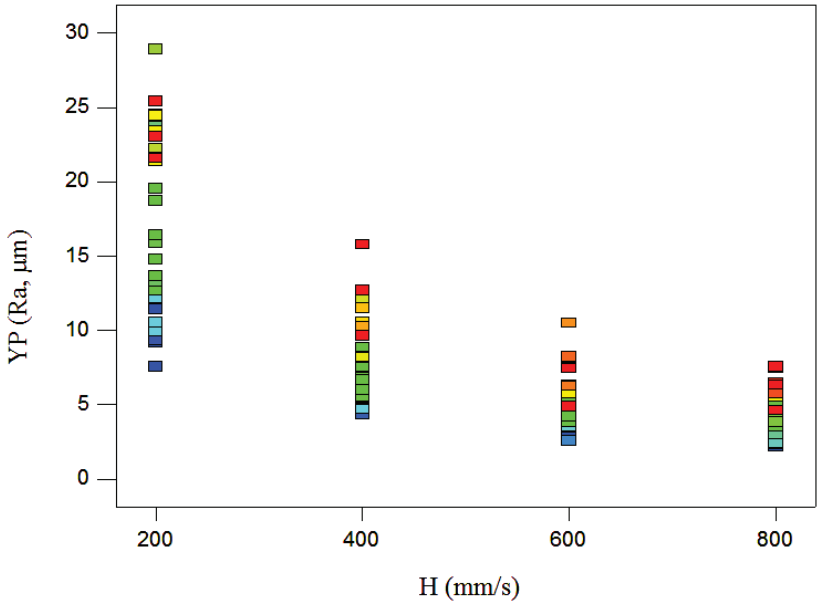


Şekil 6.21 AISI 316 paslanmaz çelik için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.23'de AISI 316 paslanmaz çelik için oyma parametrelerinden tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Bu dağılıma göre, tarama hızındaki artış yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğündeki en büyük değişim 200mm/s ile 400mm/s arasında tespit edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 200mm/s'de tespit edilmiştir ve bu hızda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 28,924µm'dir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 800mm/s'de tespit edilmiştir ve bu hızda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 2,17µm'dir. Bununla birlikte, 600mm/s ile 800mm/s arasındaki en düşük yüzey pürüzlülüğü arasındaki fark 0,38 µm' dir.



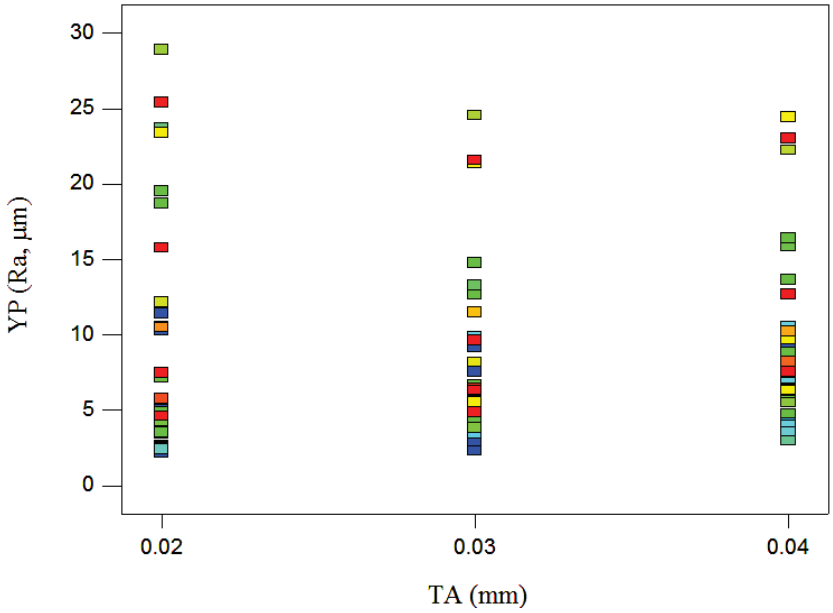
Şekil 6.22 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



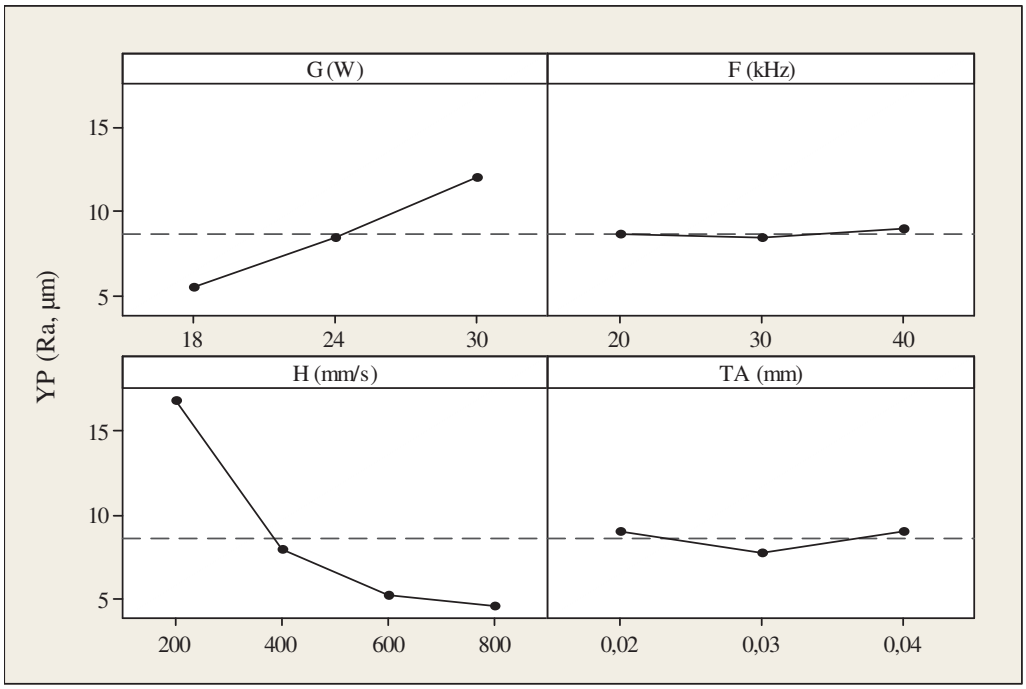
Şekil 6.23 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.24'de AISI 316 paslanmaz çelik için oyma parametrelerinden tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılım göstermektedir ki, en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,02mm'deki tarama aralığında elde edilmiştir ve ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla 28,924µm ve 2,17µm' dir. Ancak, tarama aralığı için elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki genel eğilim, tarama aralığının 0,03mm'deki değerinde diğer tarama aralıklarına göre daha düşük yüzey

pürüzlülüğü değerleri elde edildiği yönündedir. Şekil 6.25'deki grafiksel gösterimde de bu yönde bir değişimin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 6.24 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



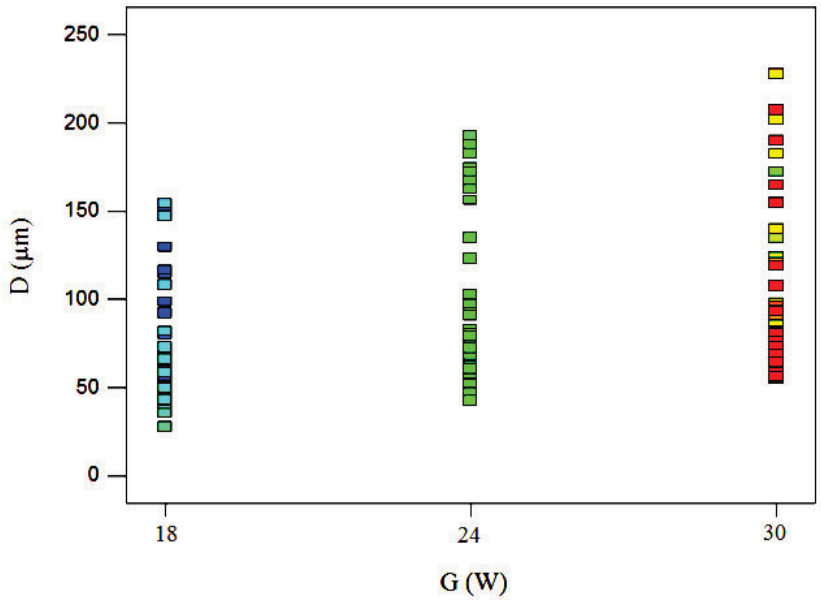
Şekil 6.25 AISI 316 paslanma çelik için parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin grafiksel gösterimi

Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal ve grafiksel gösteriminde görülmüştür ki, en düşük yüzey pürüzlülüğü etkin gücün 18W,

frekansın 20kHz - 30kHz, tarama hızının 800mm/s ve tarama aralığının 0,03mm olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 30W, 40kHz, 200mm/s ve 0,02mm'deki deney koşullarında ölçülmüştür.

6.2.2 AISI 316 paslanmaz çelik için temel işlem parametrelerinin oyma derinliğine (D) etkisi

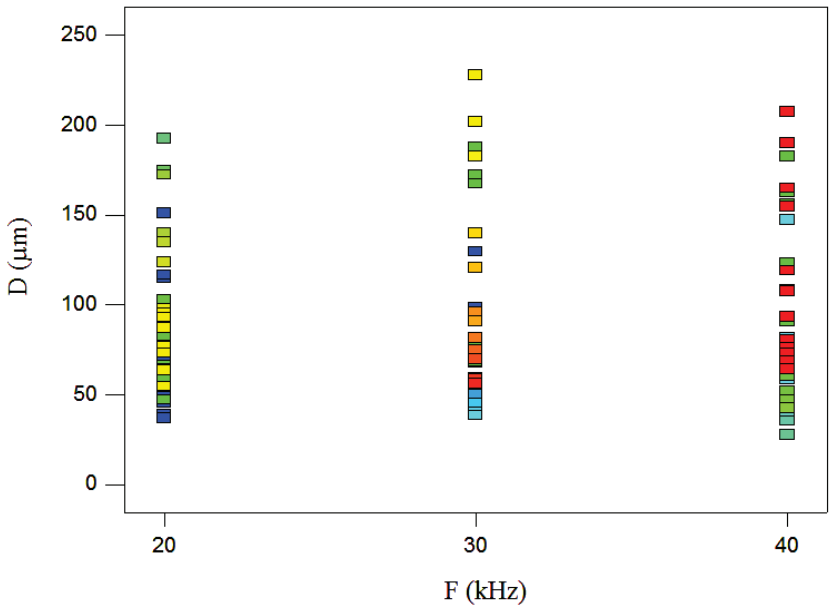
Şekil 6.26'de AISI 316 paslanmaz çelik için gücün oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Noktaların dağılımına göre güçteki artış oyma derinliğini arttırmaktadır. En yüksek oyma derinliği 30W etkin güçte tespit edilmiştir ve bu güçte ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 207,5µm'dir. En düşük oyma derinliği 18W etkin güçte tespit edilmiştir ve ölçülen oyma derinliği değeri 27,73µm'dir. Bu iki değer göstermektedir ki güç oyma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Oyma derinliğinin grafiksel gösterimi de güçteki artışın oyma derinliğini arttırdığı ve oyma derinliği üzerinde doğrusal bir değişim meydana getirdiği yönündedir.



Şekil 6.26 AISI 316 paslanmaz çelik için gücün oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.27'de AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek oyma derinliği frekansın 40kHz'deki değerinde elde edilmiştir ve ölçülen oyma derinliği değeri 207,5µm'dir. Bu değer hariç tutulmak koşulu ile noktaların dağılımının genel eğilimi ve grafiksel gösterim (Bkz. Şekil 6.30), artan frekansın oyma derinliğini arttırdığı yönündedir. Ancak noktaların dağılımı ve grafiksel

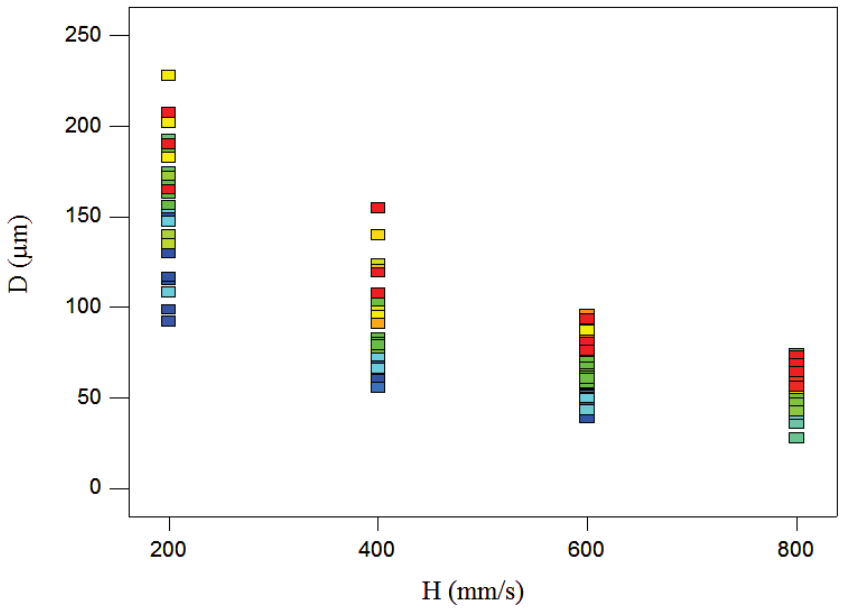
gösterime göre frekansın her bir değerinde ölçülen oyma derinliği değerleri belirgin bir değişim göstermemektedir. Örnek vermek gerekirse; 20kHz'de, 30kHz'de, 40kHz'de ölçülen en yüksek oyma derinliği değerleri sırasıyla 172,5µm, 187,5µm ve 207,5µm'dir. Diğer bir örnek de; 20kHz'de, 30kHz'de, 40kHz'de ölçülen en düşük oyma derinliği değerleri sırasıyla 36,98µm, 38,53µm ve 27,73µm'dir. Rakamlar oyma derinliğinin artan frekansla birlikte arttığını göstermektedir.



Şekil 6.27 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

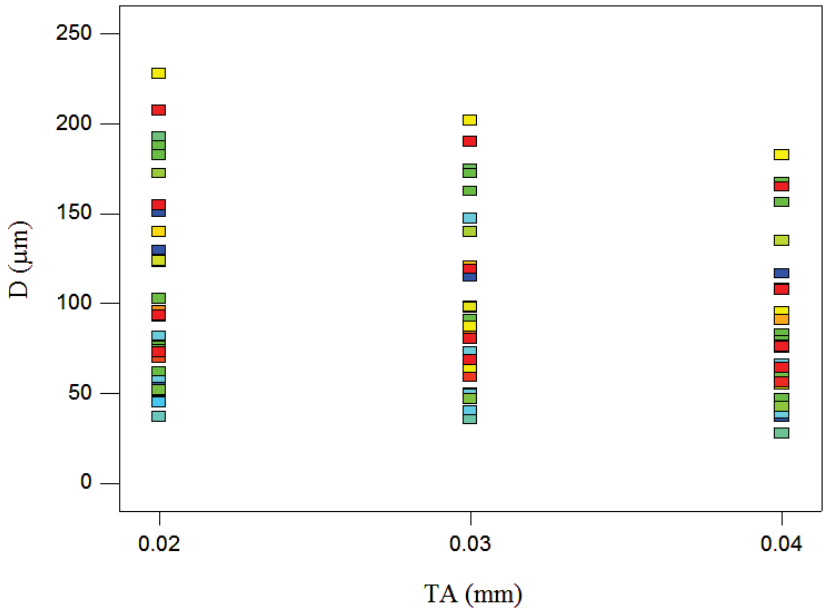
Şekil 6.28'de AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının oyma derinliğine etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımı göstermiştir ki tarama hızındaki artma oyma derinliğinde azalmaya sebep olmaktadır. En yüksek oyma derinliği (207,5µm) 200mm/s'de ölçülmekle beraber en düşük oyma derinliği (27,73µm) 800mm/s'de ölçülmüştür. Rakamlar göstermiştir ki 200mm/s ve 800mm/s arasında oyma derinliğinde belirgin bir değişim vardır ve genel bir sonuç çıkarmak gerekirse, tarama hızı da güç gibi oyma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Şekil 6.29'da AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının oyma derinliğine etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların her bir tarama aralığındaki dağılımının ve Şekil 6.30'daki grafiksel gösterimin eğilimi artan tarama aralığının oyma derinliğini azalttığı yönündedir. En yüksek oyma derinliği (207,5µm) 0,02mm'de ve en düşük oyma derinliği (27,73µm) 0,04mm'de ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar tarama aralığının, güç ve hız gibi oyma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

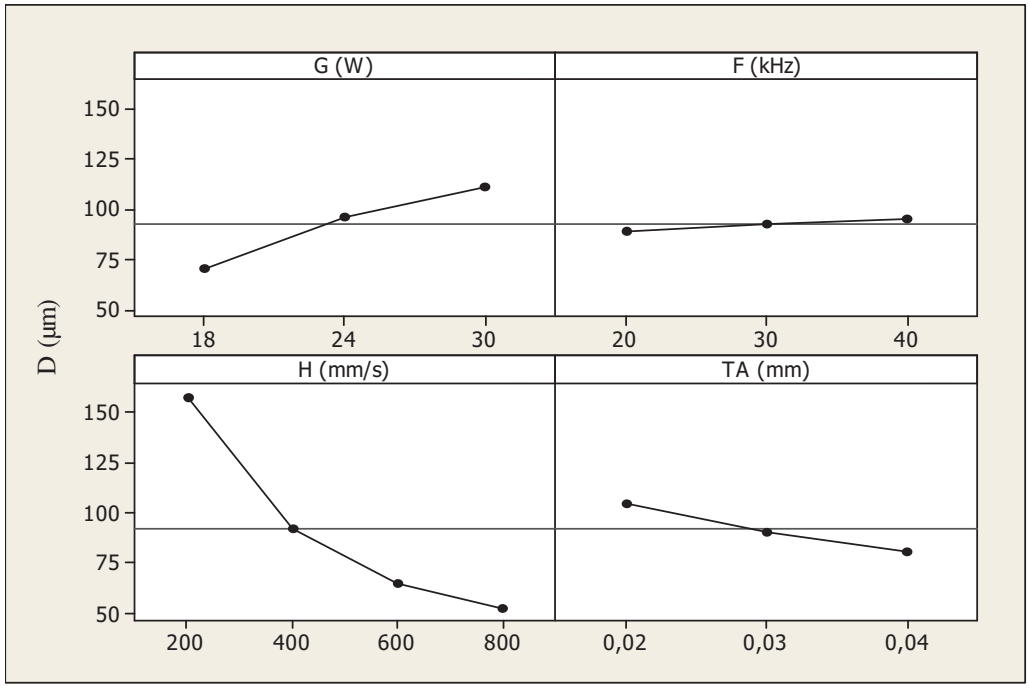


Şekil 6.28 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin noktasal ve Şekil 6.30'daki grafiksel gösteriminde görülmüştür ki, en yüksek oyma derinliği etkin gücün 30W olduğu, frekansın 40kHz olduğu, tarama hızının 200mm/s ve tarama aralığının 0,02mm olduğu şartlarda elde edilmiştir. Bununla birlikte en düşük oyma derinliği değeri 18W, 20kHz, 800mm/s ve 0,04mm'deki deney koşullarında ölçülmüştür.



Şekil 6.29 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.30 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelerin oyma derinliğine (D) etkisinin grafiksel gösterimi

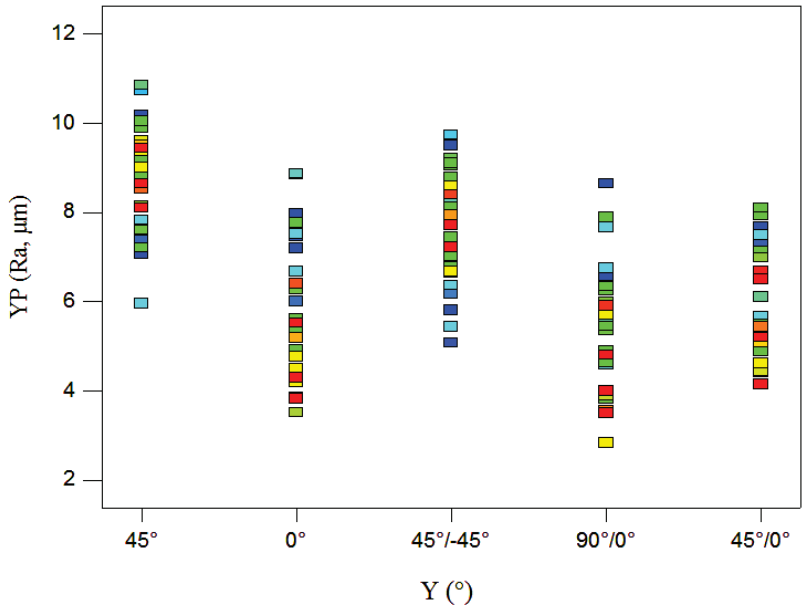
6.2.3 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.31, AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönü için noktaların dağılımı incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 90°/0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 2,83µm. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 45°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 10,86µm.

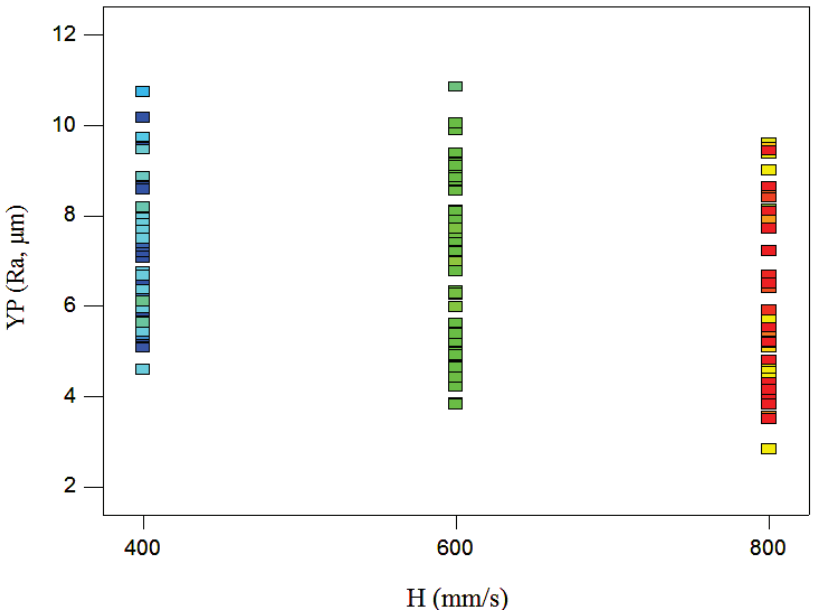
Şekil 6.32, AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Noktasal dağılımdaki eğilime göre artan tarama hızı, yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülüğü (2,83µm) ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri (10,86µm) sırasıyla 800mm/s'deki ve 400mm/s'deki tarama hızlarında tespit edilmiştir.

Şekil 6.33, AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Noktasal dağılıma göre en düşük yüzey pürüzlülüğü (2,83µm) ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri (10,86µm) 20kHz'de ölçülmüştür. Ancak ikici en yüksek yüzey pürüzlülüğü (10,75µm) ve en düşük

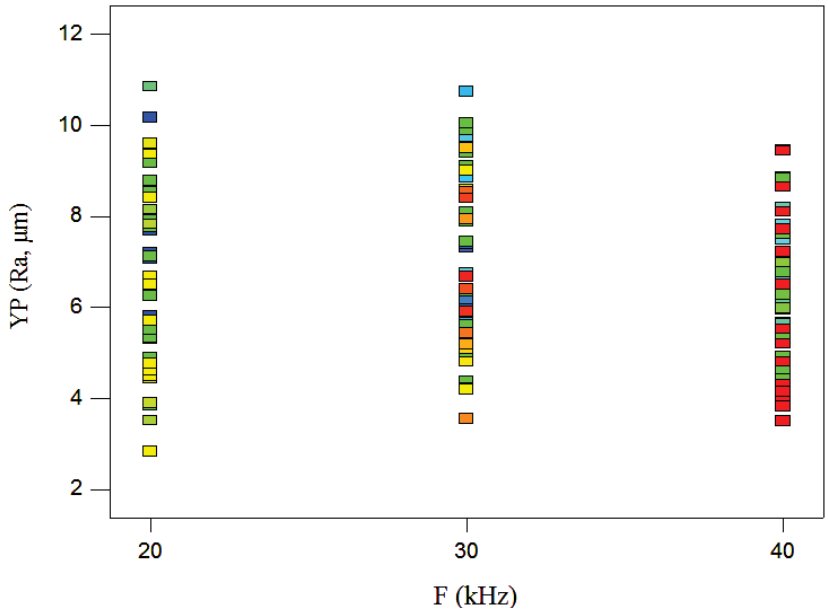
yüzey pürüzlülüğü (3,55µm) 30kHz'de ölçülmüştür. 20kHz'de ölçülen en düşük ikinci yüzey pürüzlülüğünün değeri ve 40kHz'de ölçülen en düşük yüzey pürüzlülüğünün değeri sırasıyla 3,516µm ve 3,51µm'dir. Görüldüğü gibi 20kHz, 30kHz ve 40kHz'de ölçülen en düşük yüzey pürüzlülük değerleri birbirine çok yakındır. Dolayısıyla en küçük yüzey pürüzlülüğü için frekansın etkisinin belirgin olmadığı ve ihmal edilebileceği düşünülmektedir.



Şekil 6.31 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

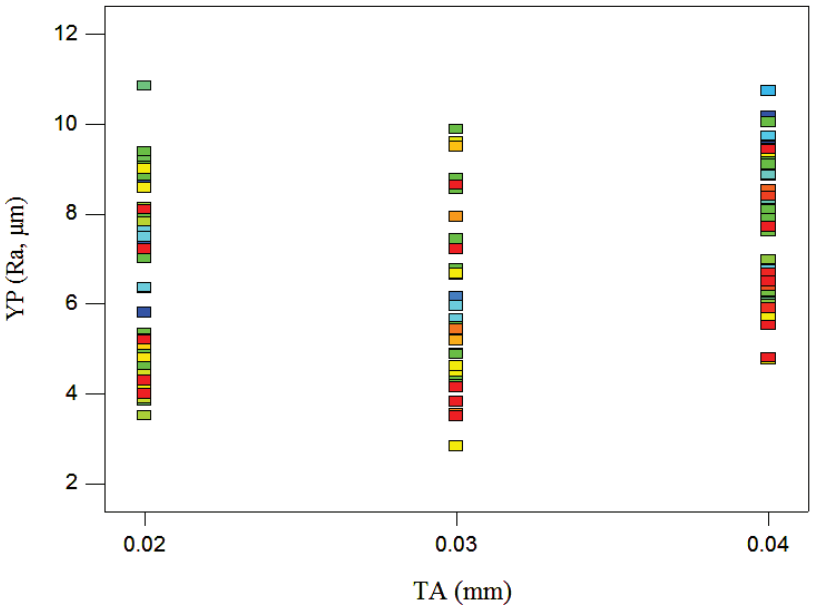


Şekil 6.32 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



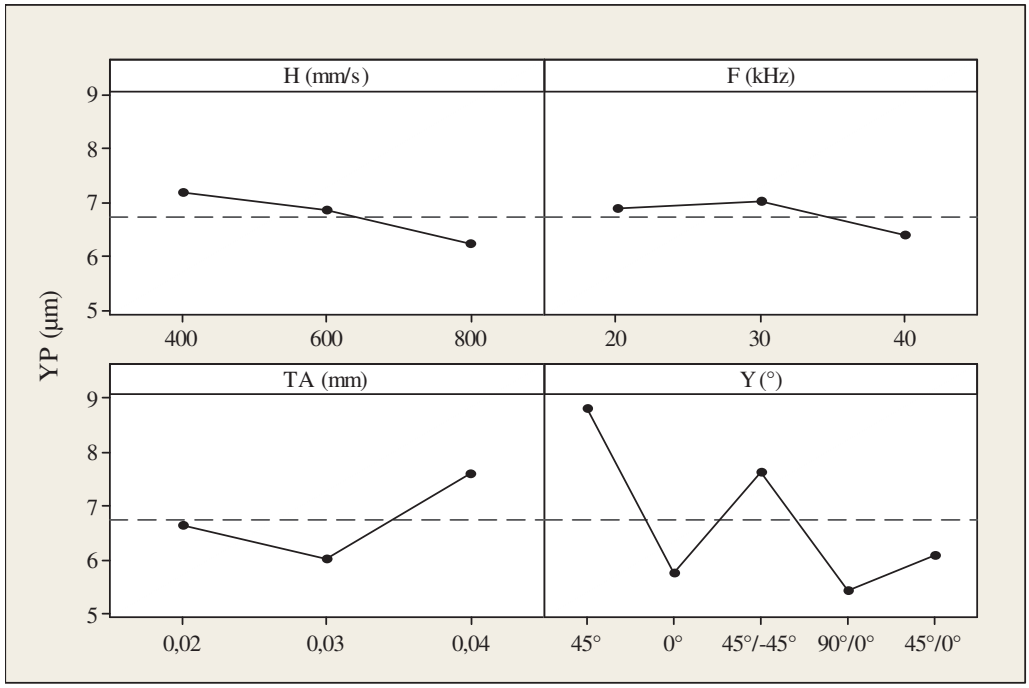
Şekil 6.33 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.34, AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,02mm'deki tarama aralığında (10,86µm) ve en düşük yüzey pürüzlülüğü (2,83µm) 0,03mm'de ölçülmüştür. 0,02mm'deki tarama aralığında en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerinin dışında diğer değerleri 0,03mm ve 0,04mm'deki tarama aralıklarında ölçülen değerlerden düşüktür. Ancak 0,04mm'de tarama aralığının noktasal dağılımı incelendiğinde 0,02mm'de elde edilen en yüksek yüzey pürüzlülüğünden sonraki en yüksek değerler 0,04mm'de görülmektedir.



Şekil 6.34 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Bu sebepten genel bir yaklaşımla en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,04mm'de tespit edilmiştir denilebilir. Şekil 6.35'deki grafiksel gösterimde de bu yönde bir eğilim görülmektedir. İşlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü 90°/0°'deki tarama yönünde, 800mm/s'de, frekansın herhangi bir değerinde (20,30,40kHz) ve 0,03mm'deki tarama aralığında tespit edilmiştir.

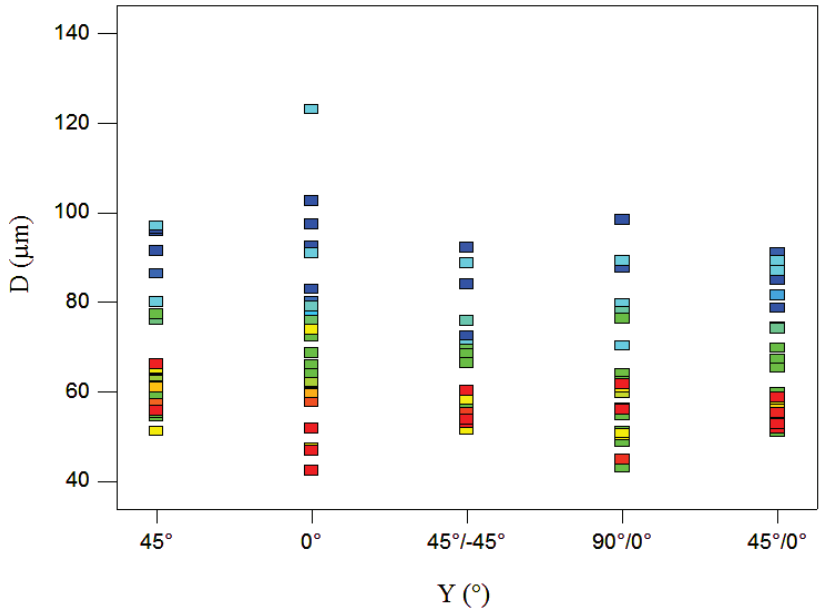


Şekil 6.35 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi

6.2.4 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine etkisi

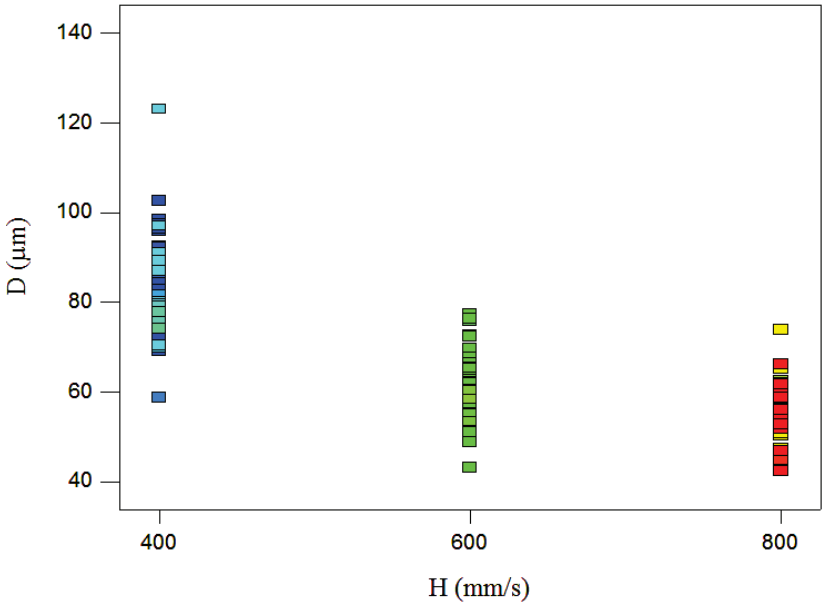
Şekil 6.36, AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönünün noktasal dağılımı incelendiğinde, en yüksek oyma derinliği değeri 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 123,08µm'dir. En düşük oyma derinliği değeri 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 42,44µm'dir. Bununla birlikte, ikinci en yüksek ve en düşük oyma derinliği değerleri 0° ve 90°/0° tarama yönlerinde tespit edilmiştir. Buna göre, en yüksek ikinci oyma derinliği değerleri 0° için 102,73µm ve 90°/0° için 98,42µm'dir. En düşük ikinci oyma derinliği değerleri 0° için 47,26µm ve 90°/0° için 43,15µm'dir. Görüldüğü

gibi değerler birbirine yakındır ve oyma derinliğini en büyük yapan tarama yönü için 0° yada 90°/0° seçilebilir.



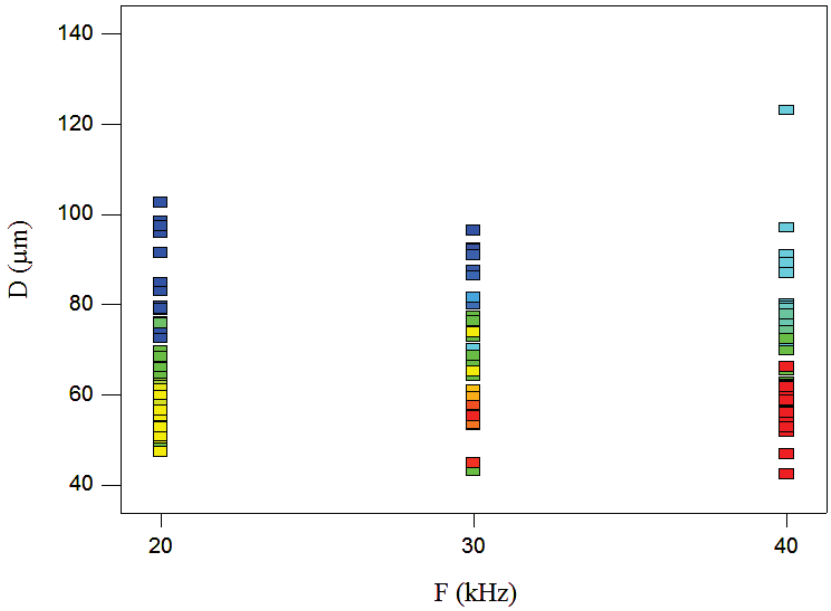
Şekil 6.36 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.37, AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. En yüksek oyma derinliği 400mm/s'deki hızda yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir.



Şekil 6.37 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

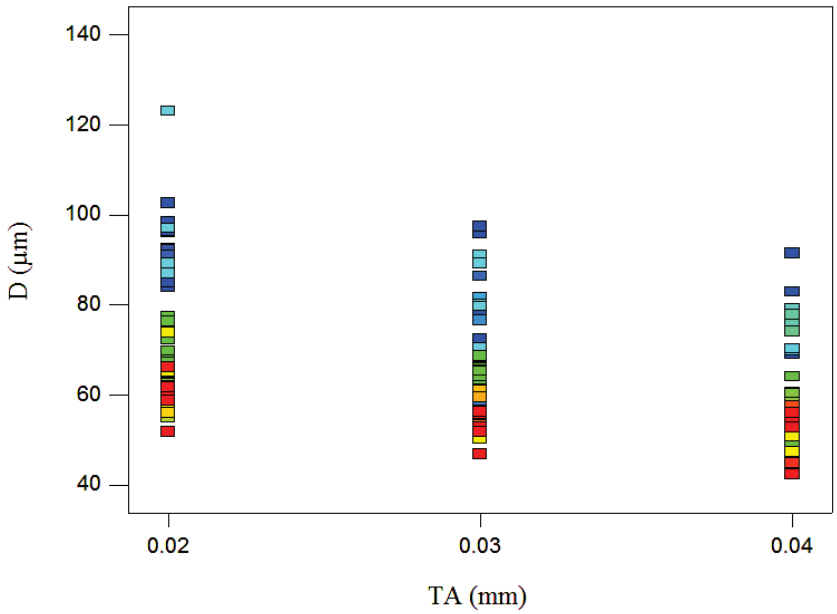
Şekil 6.38, AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. En yüksek oyma derinliği 40kHz'de tespit edilmiştir. Ancak noktaların genel dağılımına göre en yüksek ve en düşük oyma derinliği değerleri farklı frekanslarda belirgin bir değişim yaratmamıştır ve dolayısıyla oyma derinliğini en büyük ve en küçük yapan frekans yani deney sınırları içindeki herhangi bir frekans değeri seçilebilir.



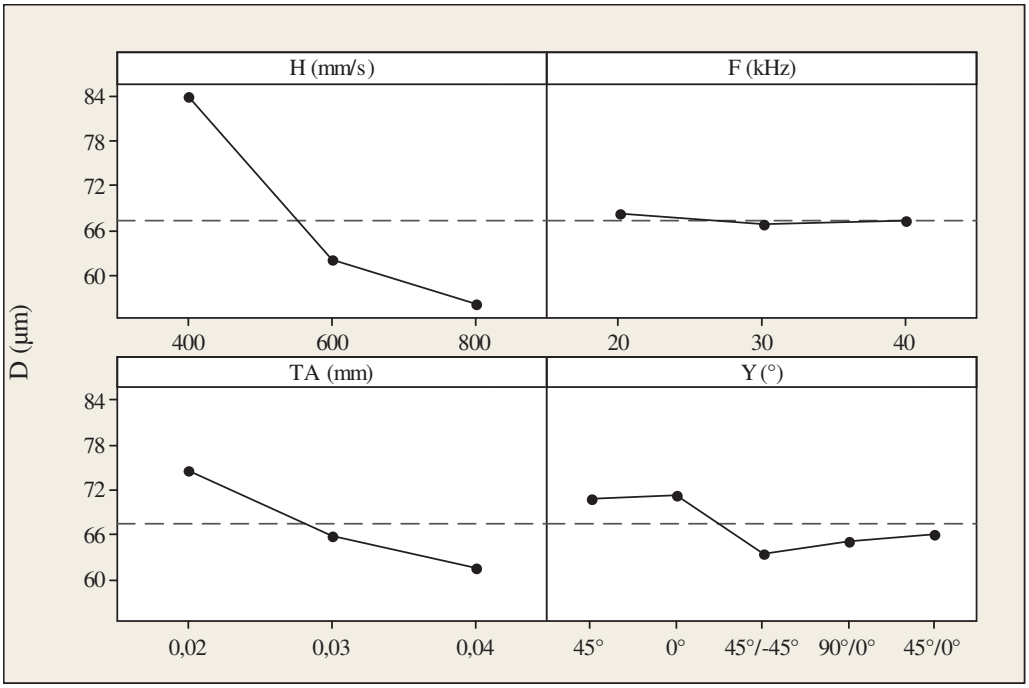
Şekil 6.38 AISI 316 paslanmaz çelik için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.39, AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Noktaların her bir tarama aralığındaki dağılımına göre en yüksek oyma derinliği değeri 0,02mm'de ve en düşük oyma derinliği değeri 0,04mm'de tespit edilmiştir.

İşlem tarama yönünün etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda en yüksek oyma derinliği değeri 0°deki tarama yönünde, 400mm/s'deki tarama hızında, frekansın herhangi bir değerinde (20,30,40kHz) ve 0,02mm'deki tarama aralığındaki oyma deney koşullarında tespit edilmiştir.



Şekil 6.39 AISI 316 paslanmaz çelik için tarama aralığı oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.40 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliği (D) etkisine yönelik işlem parametrelerinin etkisi

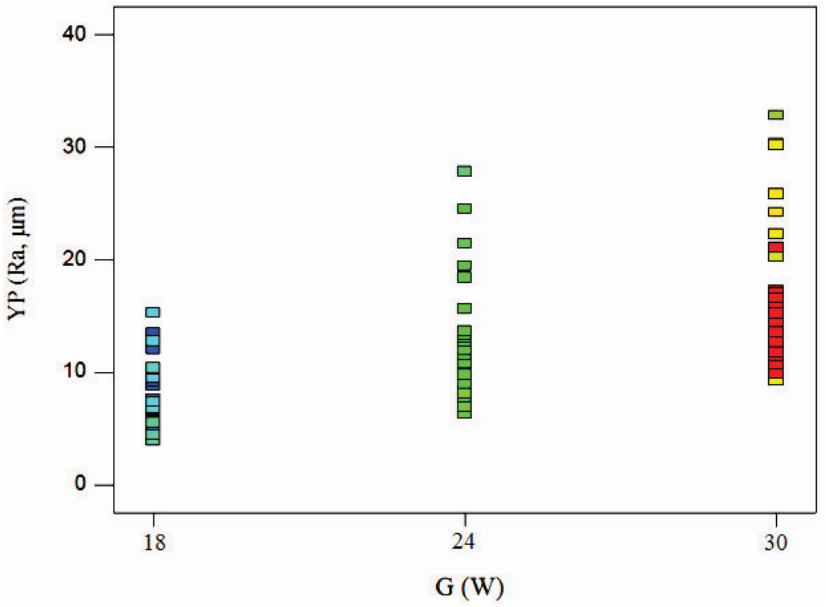
6.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının Analizi

Şekil 6.41 – 44'de ve Şekil 6.46 – 49'da AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerinin her bir değerinde ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.45'de ve

Şekil 6.50'de ise temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir. Şekil 6.51 – 54'de ve Şekil 6.56 – 59'da yüzey işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerine etkisinin noktasal gösterimleri görülmektedir. Şekil 6.55'de ve Şekil 6.60'da ise işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir.

6.3.1 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

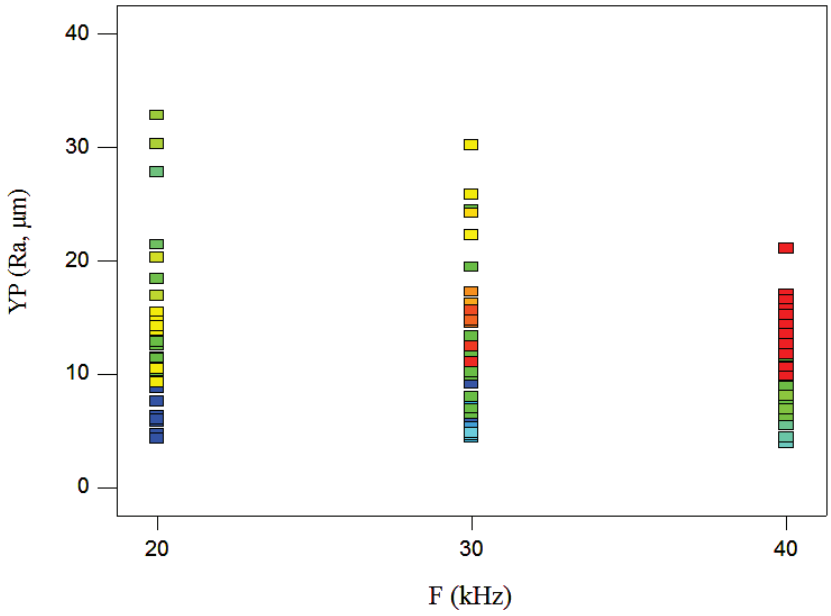
Şekil 6.41'de AA 7075 alüminyum alaşımı için lazer oyma parametrelerinden gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Noktasal dağılıma göre güçteki artış yüzey pürüzlülüğünde doğrusal bir artış meydana getirmektedir. Benzer eğilim grafiksel gösterimde de görülmektedir (Bkz. Şekil 6.45). En yüksek yüzey pürüzlülüğü 30W etkin güçte elde edilmiştir ve ölçülen değer 32,84µm'dir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 18W güçte elde edilmiştir ve ölçülen değer 3,86µm'dir.



Şekil 6.41 AA 7075 alüminyum alaşımı için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Noktasal dağılımda ve grafiksel gösterimde görülen bu eğilim ve rakamsal değerler gücün, yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

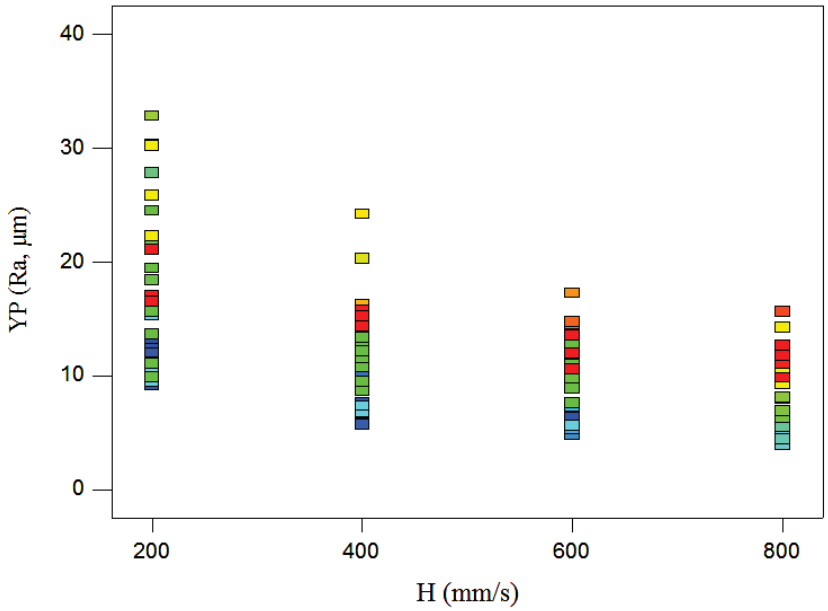
Şekil 6.42'de AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Noktaların dağılımı incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünün frekanstaki artışla birlikte azaldığı görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 40kHz'de elde edilmiş ve bu frekansta ölçülen değer 3,86 µm'dir. Ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü 32,84µm'dir ve bu değer 20kHz'de elde edilmiştir. Hem grafiksel gösterim hem de noktasal dağılım 20kHz ve 30kHz için yüzey pürüzlülüğünün en yüksek değerleri arasındaki değişimin küçük olduğunu bununla birlikte, bu frekanslarda ölçülen en küçük yüzey pürüzlülükleri değerleri arasındaki değişimin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu göstermektedir. Değişim rakamlarla ifade edildiğinde; bu frekanslarda ölçülen en yüksek değerler sırasıyla 32,84µm ve 30,22µm'dir ki değişim de %8,66'dır. En küçük yüzey pürüzlülükleri değerleri sırasıyla 4,34 µm ve 4,44 µm'dir ve bu değerler arasındaki değişim %2,3'dür ki bu değişim miktarı yüzey pürüzlülüğünün genel dağılımı içinde ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Genel bir değerlendirme ile frekansın yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişim meydana getirmediği söylenebilmektedir.



Şekil 6.42 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.43'de AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Noktasal dağılımdaki eğilim göstermektedir ki, tarama hızındaki artma yüzey pürüzlülüğünde iyileşme yani yüzey pürüzlülüğü değerinde azalmaya sebep olmaktadır. Grafiksel gösterim de (Bkz. Şekil 6.46) bu yönde benzer bir eğilim göstermektedir. Hem noktasal dağılım hem de grafiksel gösterim yüzey

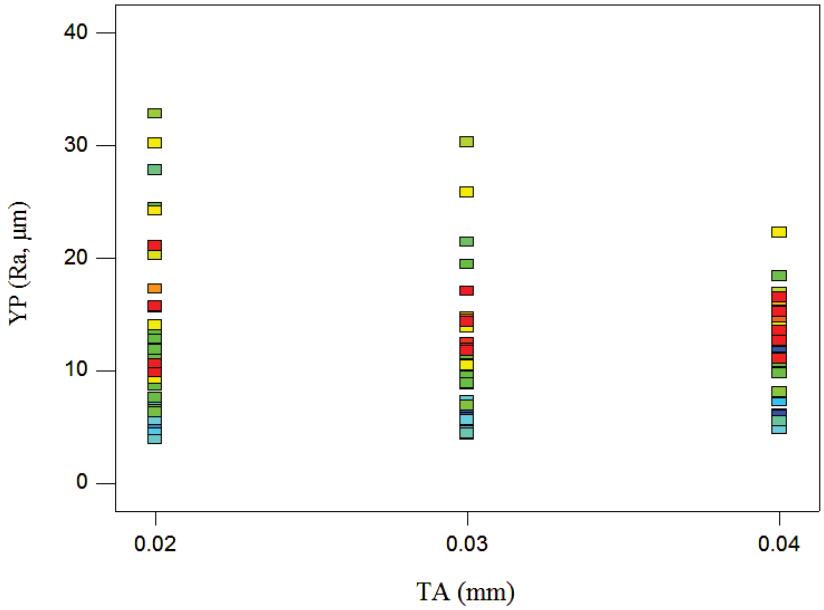
pürüzlülüğünde en belirgin değişimin 200mm/s ile 400mm/s arasında olduğunu göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 800mm/s'de elde edilmiş ve bu hızda ölçülen değer 3,86 µm'dir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü 200mm/s'de elde edilmiş ve bu hızda ölçülen değer 32,84µm'dir. Ölçülen en yüksek yüzey pürüzlülüğü ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri tarama hızının, yüzey pürüzlülüğündeki değişimde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.



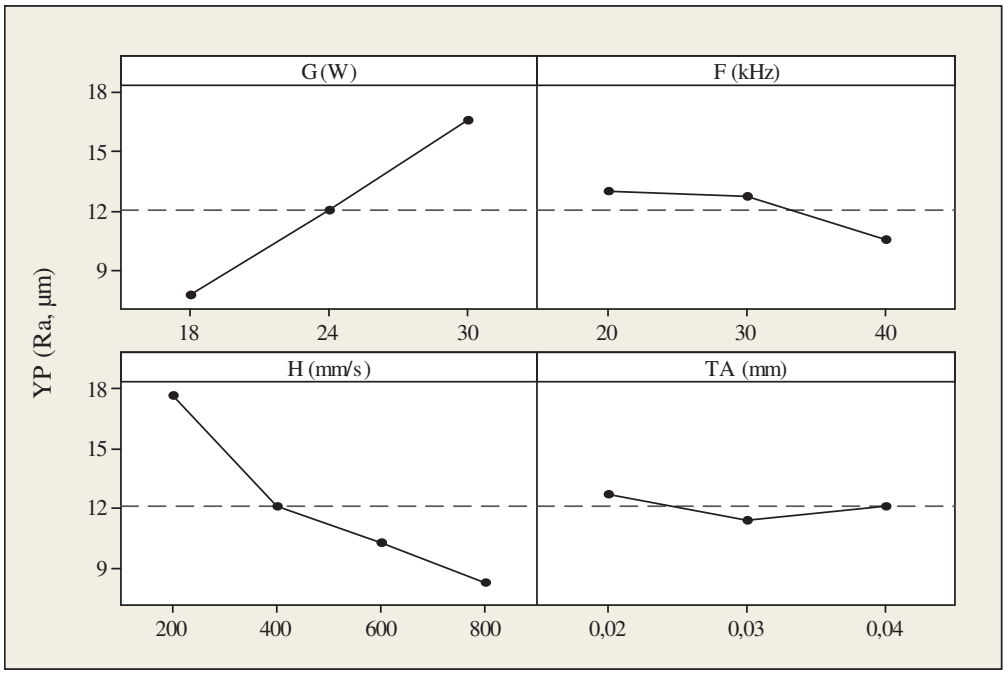
Şekil 6.43 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.44'de AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değerlerinde noktaların dağılımı incelendiğinde görülmektedir ki, artan tarama aralığı yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmektedir. Ancak, en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinde noktaların dağılımı değişmektedir ve tam tersi bir durum meydana gelmektedir yani, artan tarama aralığı yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.

Şekil 6.45'deki grafiksel gösterim bilindiği gibi ortalamalara göre çizilmiştir ve buradaki eğilim 0,02mm ile 0,03mm arasında yüzey pürüzlülüğünde azalmanın buna karşın, 0,03mm ile 0,04mm arasında yüzey pürüzlülüğünde artmanın meydana geldiği yönündedir, ancak bu artış çok yüksek değildir. Bu durum noktasal dağılımın ortalama değerlerinde de görülmektedir.



Şekil 6.44 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

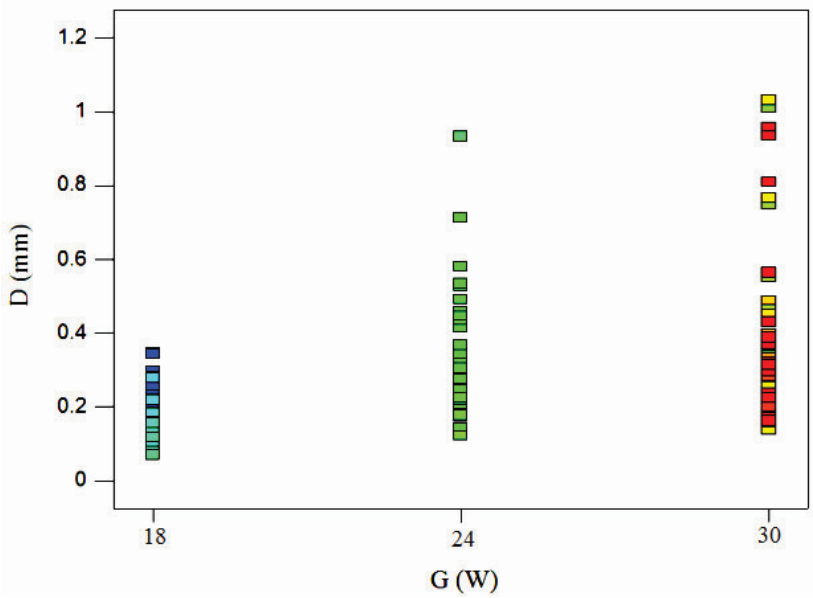


Şekil 6.45 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal ve Şekil 6.45'de görülen grafiksel gösterimde görülmektedir ki, en düşük yüzey pürüzlülüğü etkin gücün 18W, frekansın 20-30kHz, tarama hızının 800mm/s ve tarama aralığının 0,03mm olduğu deney koşulunda elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 30W, 20kHz, 200mm/s ve 0,02mm'deki deney koşulunda ölçülmüştür.

6.3.2 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerinin oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.46, AA 7075 alüminyum alaşımı için gücün oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Her bir güç değeri için noktaların dağılımı ve Şekil 6.50'deki grafiksel gösterim incelendiğinde, güçteki artışın oyma derinliğinde artış meydana getirdiği görülmektedir. En yüksek oyma derinliği değeri 30W etkin güçte elde edilmiştir ve ölçülen değer 1,032mm'dir. Bununla birlikte, en düşük oyma derinliği değeri 18W etkin güçte elde edilmiştir ve ölçülen değer 0,071mm'dir. En yüksek güç ve en düşük güçte ölçülen değerler arasındaki fark çok belirgin olmakla birlikte, güçteki artışla doğrusal bir değişimin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu yaklaşımla rakamların gösterdiği değerlere göre gücün, oyma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir.

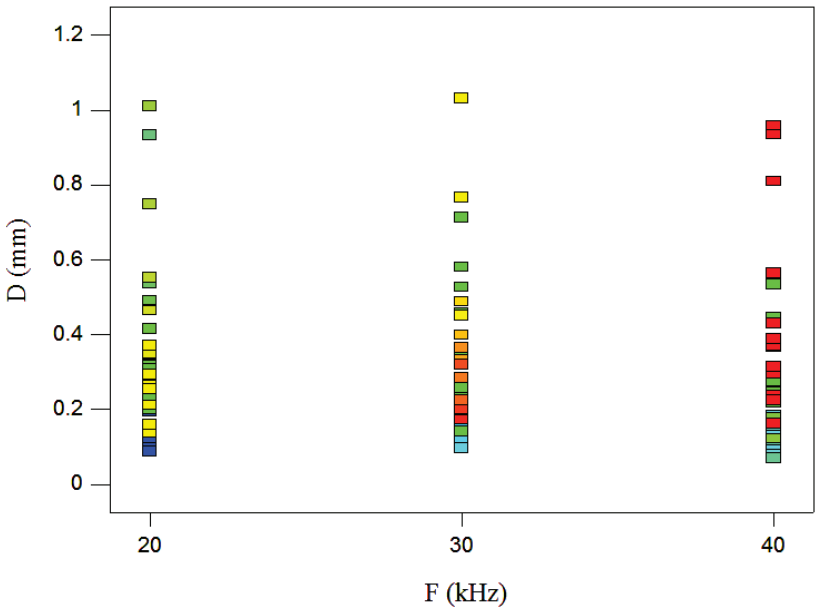


Şekil 6.46 AA 7075 alüminyum alaşımı için gücün oyma derinliğine (D) etkisi

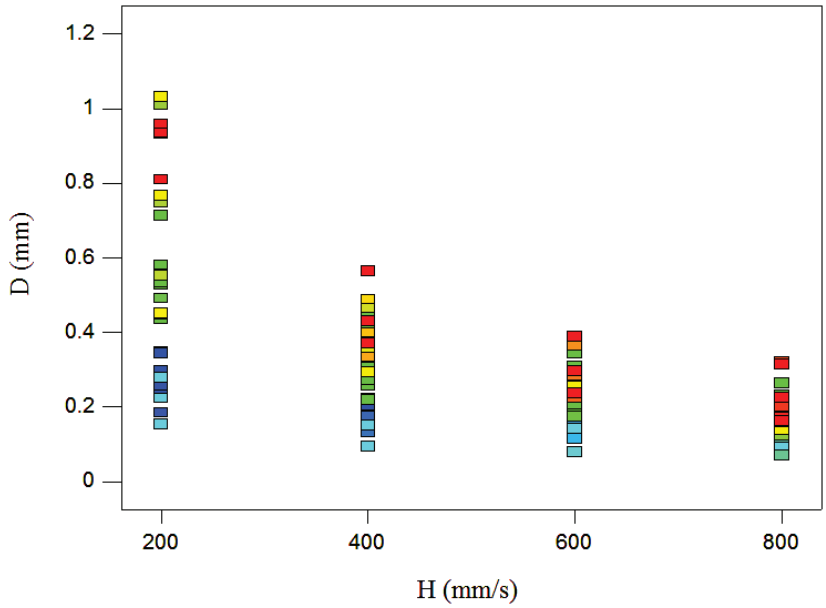
Şekil 6.47, AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımını göstermektedir. Ölçülen oyma derinliği değerlerinin noktasal ve Şekil 6.50'deki grafiksel gösterimine göre, en düşük oyma derinliği (0,071mm) 40kHz'de ve en yüksek oyma derinliği (1,032mm) 30kHz'de elde edilmiştir. Ölçülen derinliklerin noktasal dağılımında yığılmanın olduğu bölgedeki eğilim, oyma derinliğinin artan frekansla azaldığı yönündedir. Şekil 6.50'deki grafik incelendiğinde 20kHz ile 40kHz arasındaki oyma derinliği değerlerinin belirgin bir değişim göstermediği görülmektedir dolayısıyla, frekansın oyma derinliği üzerinde belirgin bir etkiye sahip olmadığı söylenebilir.

Şekil 6.48, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımını göstermektedir. Noktasal dağılıma göre tarama hızındaki artış oyma derinliğinde artış meydana getirmektedir. Şekil 6.50'deki grafiksel gösterimde de noktasal dağılımdaki eğilime benzer bir eğilim görülmektedir. En yüksek oyma derinliği 200mm/s'de ve en düşük oyma derinliği 400mm/s'de tespit edilmiştir ve ölçülen değerler sırasıyla 1,032mm ve 0,071mm'dir. Bununla birlikte farklı hızlarda elde edilen değerler arasındaki değişim yüksektir ki bu durum tarama hızının oyma derinliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

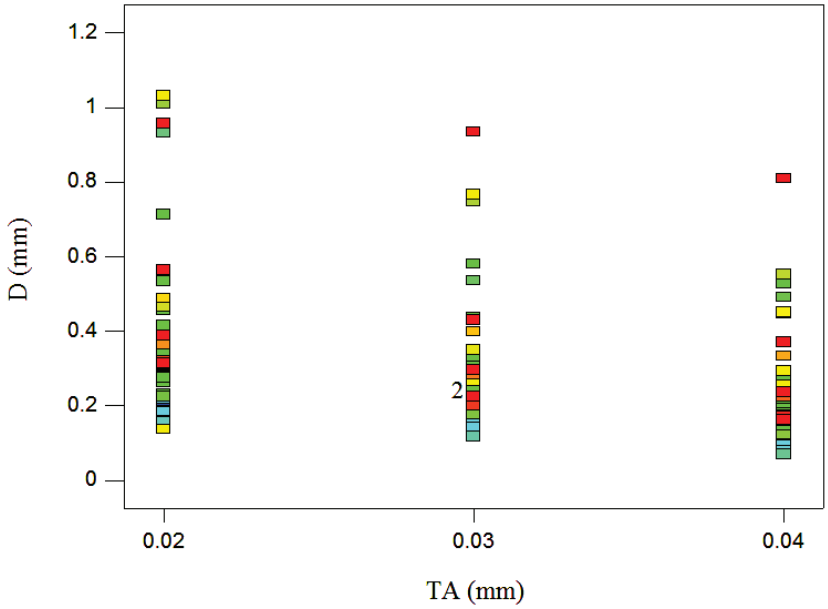
Şekil 6.49, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımını göstermektedir. Ölçülen değerlerin noktasal dağılımındaki eğilim, artan tarama aralığının oyma derinliğini arttırdığı yönündedir. En yüksek oyma derinliği 0,02mm'de ve en düşük oyma derinliği 0,04mm'de elde edilmiştir. Tarama aralığının 0,02mm'deki değeri için ölçülen en yüksek oyma derinliği değeri 1,032mm ve en düşük oyma derinliği 0,137mm'dir. Bununla birlikte, ölçülen en düşük oyma derinliği 0,04mm'deki tarama aralığında ölçülmüştür ve değeri de 0,071 mm'dir. 0,02mm'de ölçülen en düşük oyma derinliği ve 0,04mm'de ölçülen en düşük oyma derinliği değerleri arasındaki fark 0,066mm'dir. Bu değerler göstermektedir ki, tarama hızı ve güç gibi tarama aralığı da oyma derinliği üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir



Şekil 6.47 AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

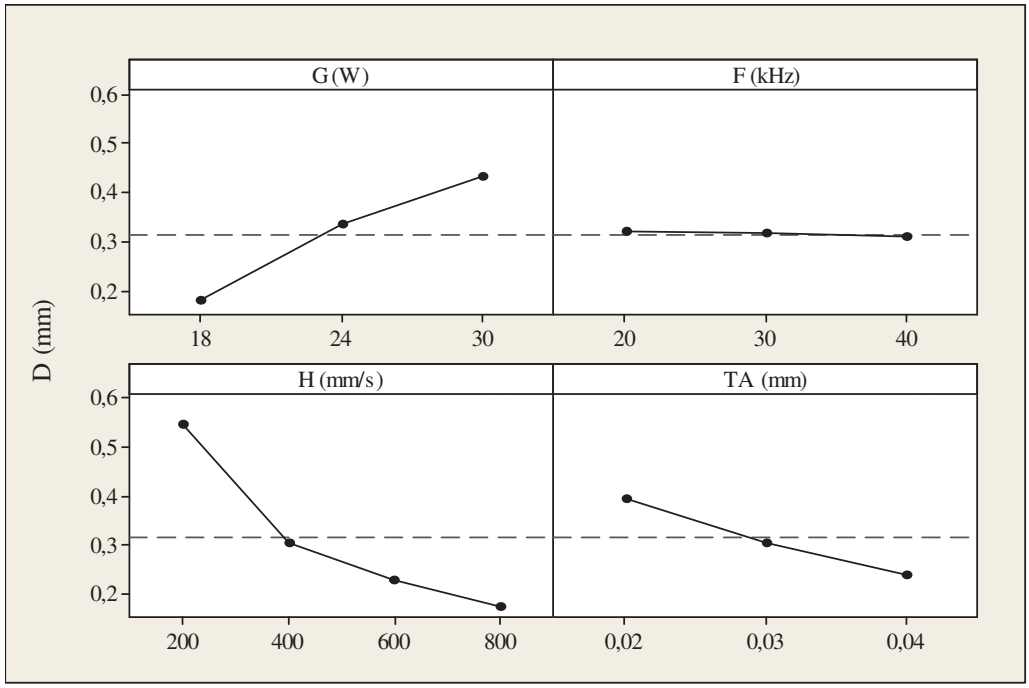


Şekil 6.48 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.49 AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi

Parametrelerin oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal ve Şekil 6.50'deki grafiksel gösterimde görülmektedir ki, en yüksek oyma derinliği; etkin gücün 30W, frekansın 40kHz, tarama hızının 200mm/s ve tarama aralığının 0,02mm olduğu deney koşulunda elde edilmiştir. Bununla birlikte en yüksek oyma derinliği; 18W, 20 – 30kHz, 800mm/s ve 0,04mm'deki deney koşulunda ölçülmüştür.



Şekil 6.50 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel işlem parametrelerin oyma derinliğine (D) etkisi

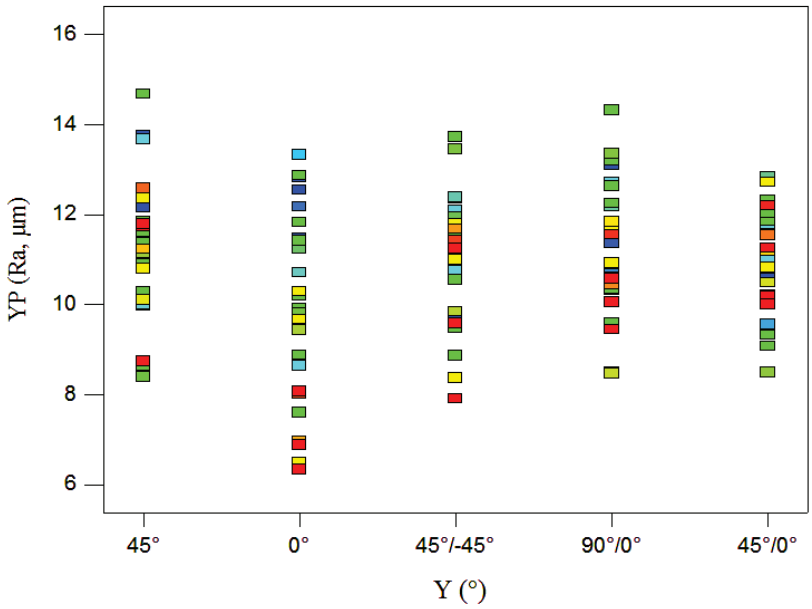
6.3.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.51, AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönü için noktaların dağılımı incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 6,33µm. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 45°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 14,686µm.

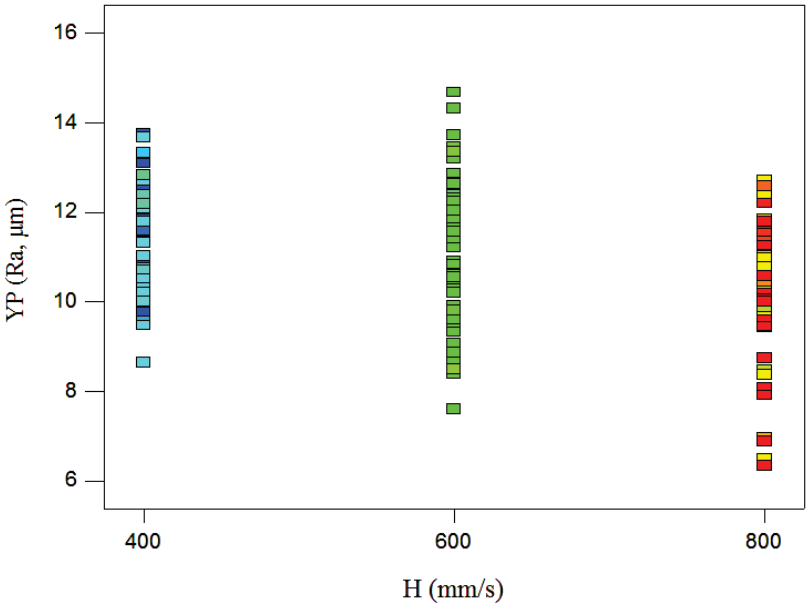
Şekil 6.52, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. 600mm/s'de ölçülen iki değer dışında eğilim, artan tarama hızının yüzey pürüzlülüğünde azalmaya sebep olduğu yönündedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü (6,33µm) 800mm/s'deki tarama hızında tespit edilmiştir.

Şekil 6.53, AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü (6,33µm) 40kHz'deki tarama hızında tespit edilirken 30kHz'de ölçülen en düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 6,5µm'dir. 30kHz'de ve 40kHz'de ölçülen en düşük yüzey pürüzlülük değerleri birbirine çok yakın hatta neredeyse aynıdır. Bu sebepten tarama

yönünün tespitine yönelik yapılan oyma işleminde yüzey pürüzlülüğünü en küçük yapan frekans değeri 30kHz ve 40kHz'dir.



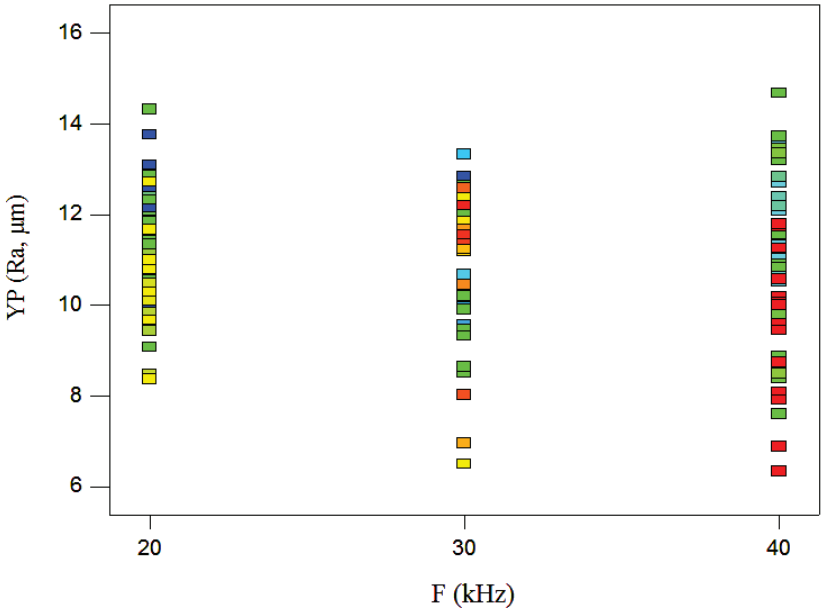
Şekil 6.51 AA7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



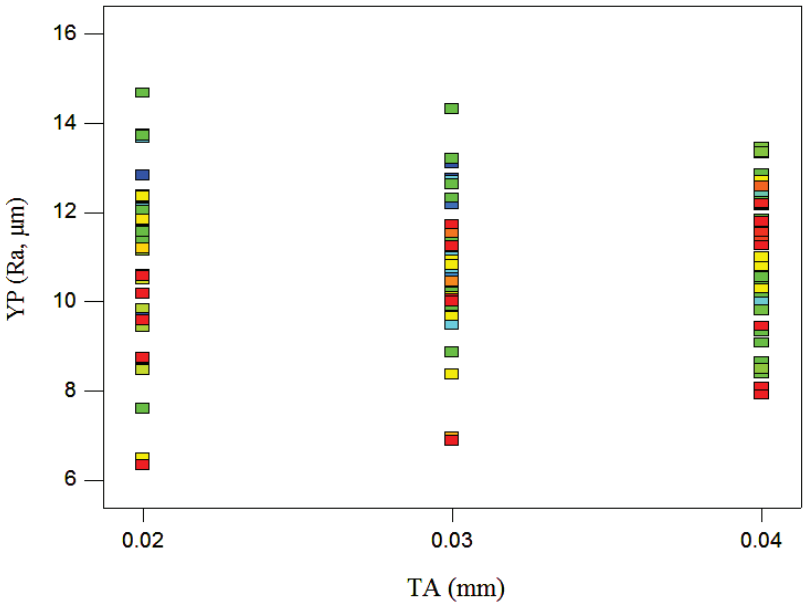
Şekil 6.52 AA7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.54, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisini göstermektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 0,02mm'de tespit edilmiştir. Şekil 6.56'daki grafiksel gösterimde en düşük yüzey pürüzlülüğü 0,02mm'de tespit edilmiştir ve bununla birlikte, tarama aralıklarında

ölçülen değerler arasındaki değişim de çok küçüktür. Hem noktasal dağılıma hem de grafiksel gösterime göre en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,02mm'de ve 0,04mm'de meydana gelmiştir.



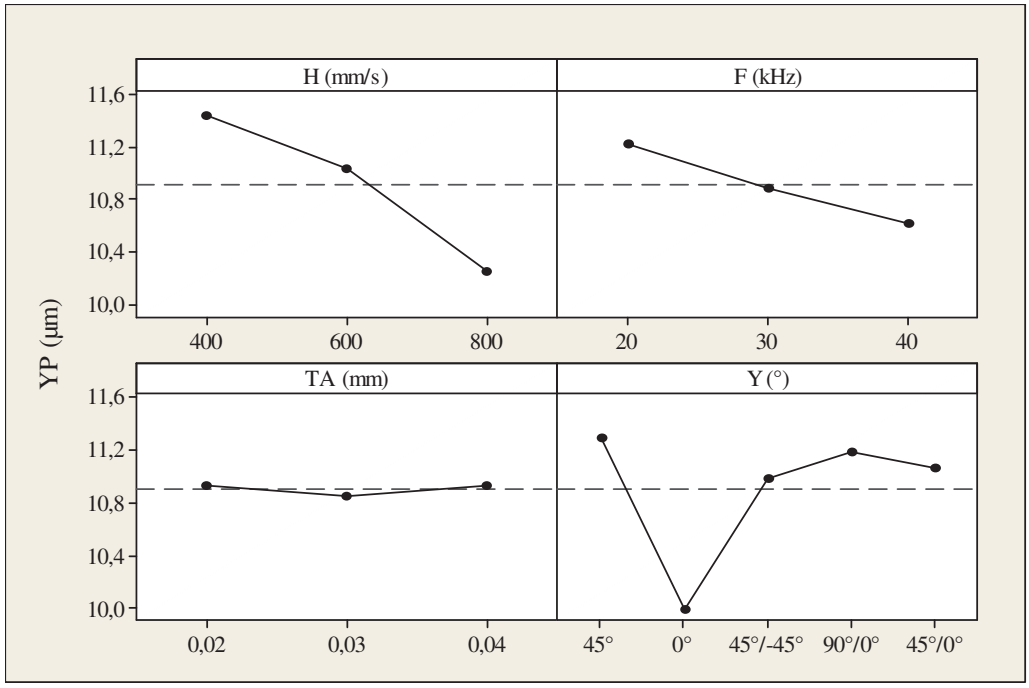
Şekil 6.53 AA7075 alüminyum alaşımı için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



Şekil 6.54 AA7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Elde edilen sonuçlara göre genel bir değerlendirmeyle, tarama aralığının farklı işleme yönleri için yüzey pürüzlülüğü üzerinde çok büyük bir değişim yaratmadığı söylenebilir.

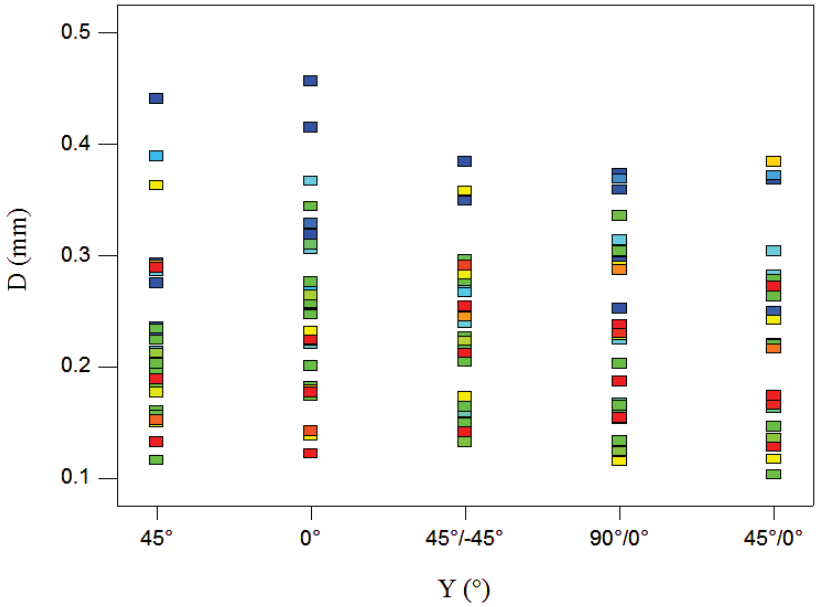
İşlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda elde edilen sonuçların noktasal gösterimi ve Şekil 6.55'deki grafiksel gösterimine göre en düşük yüzey pürüzlülüğü 0°'deki tarama yönünde, 800mm/s'de, frekansın herhangi bir değerinde (30,40kHz) ve 0,02mm'deki tarama aralığında tespit edilmiştir.



Şekil 6.55 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün etkisine yönelik işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin grafiksel gösterimi

6.3.4 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.56, AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. Beş farklı tarama yönü için noktaların dağılımı incelendiğinde, en yüksek oyma derinliği değeri 0°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 0,457mm'dir. En düşük oyma derinliği değeri 45°/-45°'de yapılan oyma işleminde tespit edilmiştir ve ölçülen değer 0,132mm'dir. Şekil 6.60'daki grafiksel gösterime göre en yüksek oyma derinliği 0°'deki tarama yönünde ve en düşük oyma derinliği 45°/0°'deki tarama yönünde tespit edilmiştir. En düşük oyma derinliği için noktasal gösterimle grafiksel gösterim arasındaki fark, grafiksel gösterimin ortalama oyma derinliğine göre çizilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.

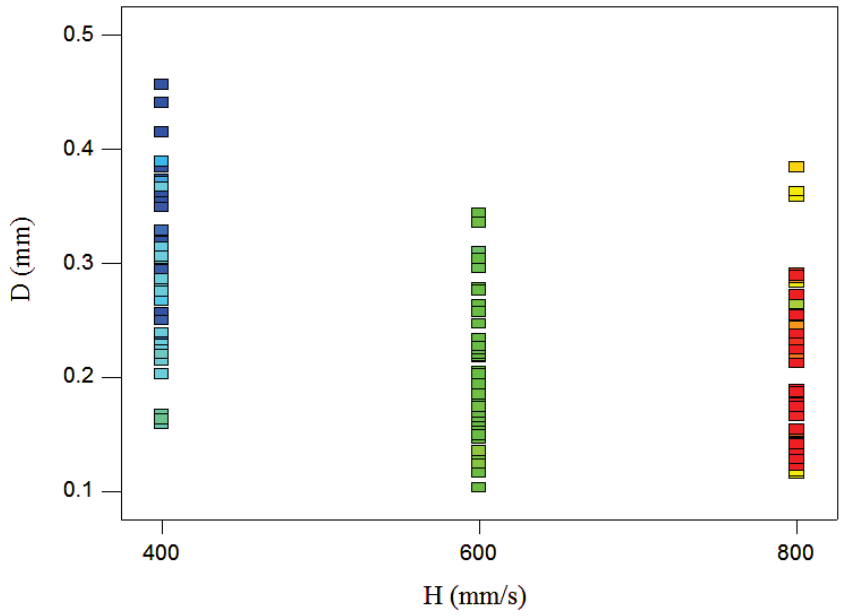


Şekil 6.56 AA7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

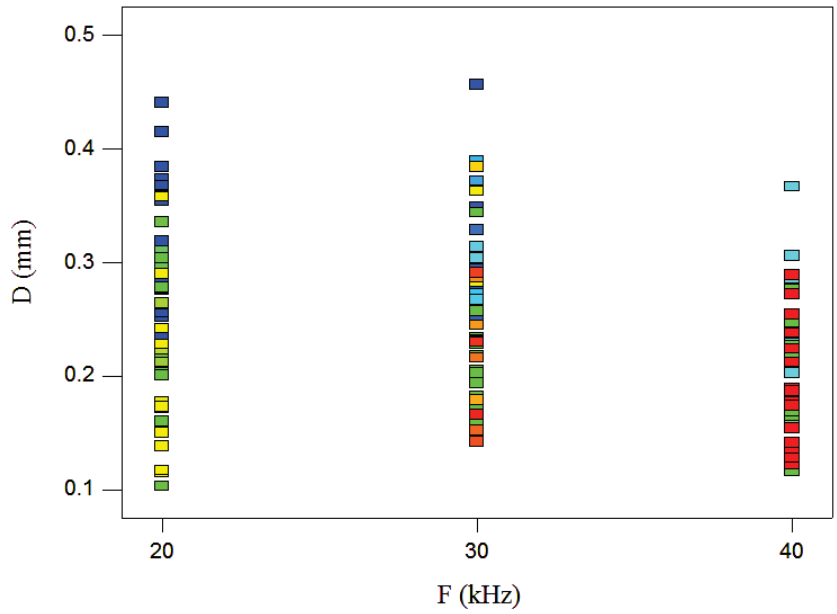
Şekil 6.57, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. En yüksek oyma derinliği (0,457mm) tarama hızının 400mm/s'deki değerinde ölçülmüştür. Şekil 6.60'daki grafiksel gösterimde en düşük oyma derinliği 600mm/s'deki tarama hızında gösterilmiş olmasına rağmen noktasal dağılımda yani gerçekte en düşük oyma derinliği değeri 800mm/s'deki tarama hızında ölçülmüştür.

Şekil 6.58, AA 7075 alüminyum alaşımı için frekansın oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. En yüksek oyma derinliği 30kHz'de ölçülmüştür. Ölçülen en yüksek oyma derinliğinin dışında, ölçülen diğer en yüksek iki oyma derinliği değerleri 20kHz'de tespit edilmiştir. Ancak noktaların genel dağılımında oyma derinliğinin en yüksek değerleri 30kHz ve 20kHz'de ölçüldüğünden en büyük oyma derinliği değerini veren frekans değeri 20kHz yada 30kHz seçilebilir.

Şekil 6.60'daki grafiksel gösterimde ise oyma derinliği 20kHz ile 30kHz arasında çok az bir artış gösterirken (ki bu artış miktarı ihmal edilebilecek kadar düşüktür), 30kHz ile 40Hz arasında hızlı bir azalış göstermiştir.



Şekil 6.57 AA7075 alüminyum alaşımı için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

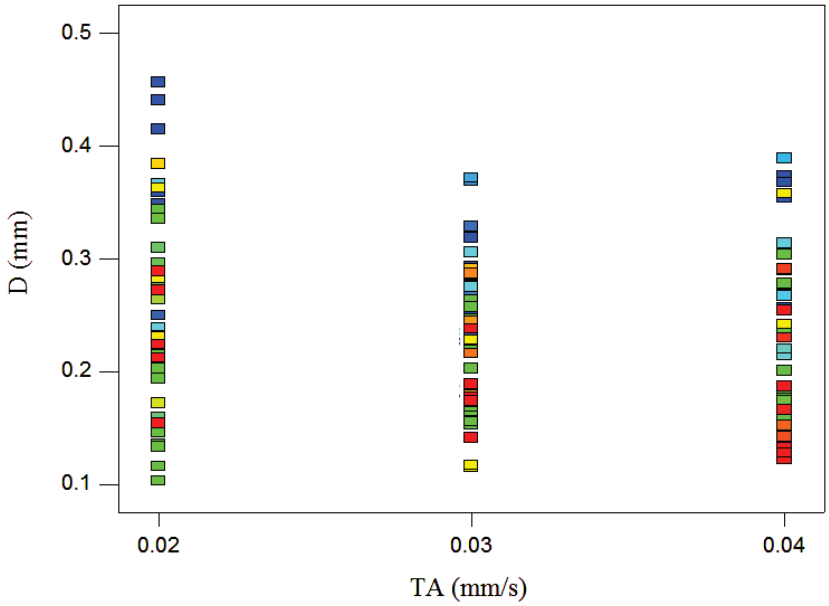


Şekil 6.58 AA7075 alüminyum alaşımı için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

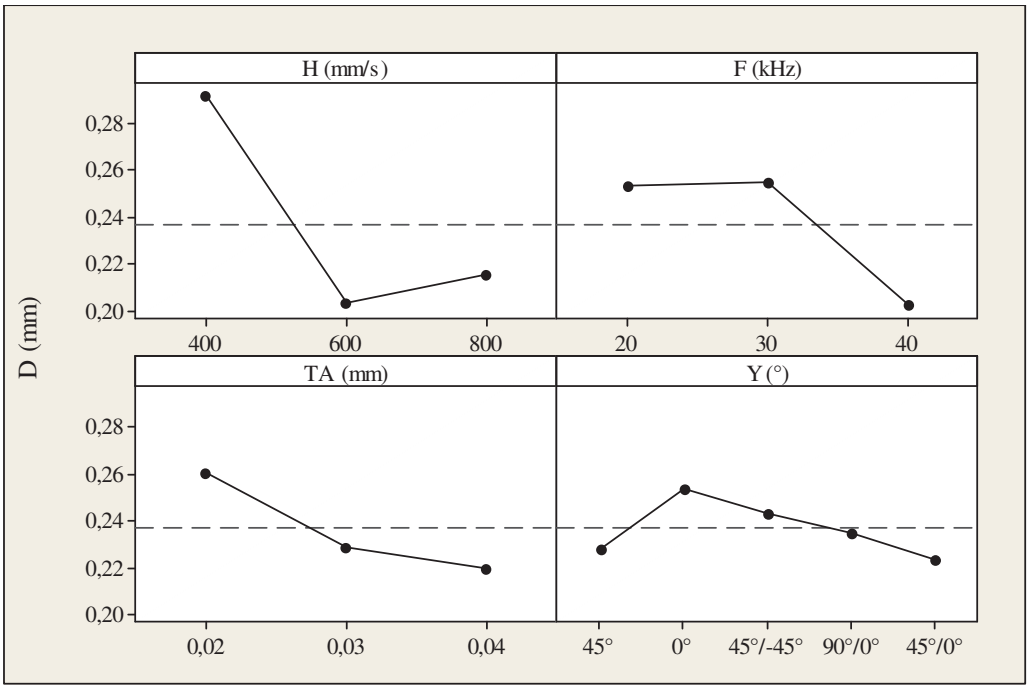
Şekil 6.59, AA 7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisini göstermektedir. En yüksek oyma derinliği (0,457mm) değeri 0,02mm'de ölçülmüştür. Noktaların genel dağılımında 0,02mm ve 0,03mm arasında oyma derinliğinde azalma ve 0,03mm ve 0,04mm arasında artış tespit edilmiştir.

İşlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda hem noktasal gösterim hem de grafiksel gösterime (Bkz.

Şekil 6.60) göre en yüksek oyma derinliği 0°'deki tarama yönünde, 400mm/s'deki tarama hızında, 20kHz'deki frekansta ve tarama aralığının 0,02mm olduğu deney koşulunda tespit edilmiştir.



Şekil 6.59 AA7075 alüminyum alaşımı için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi



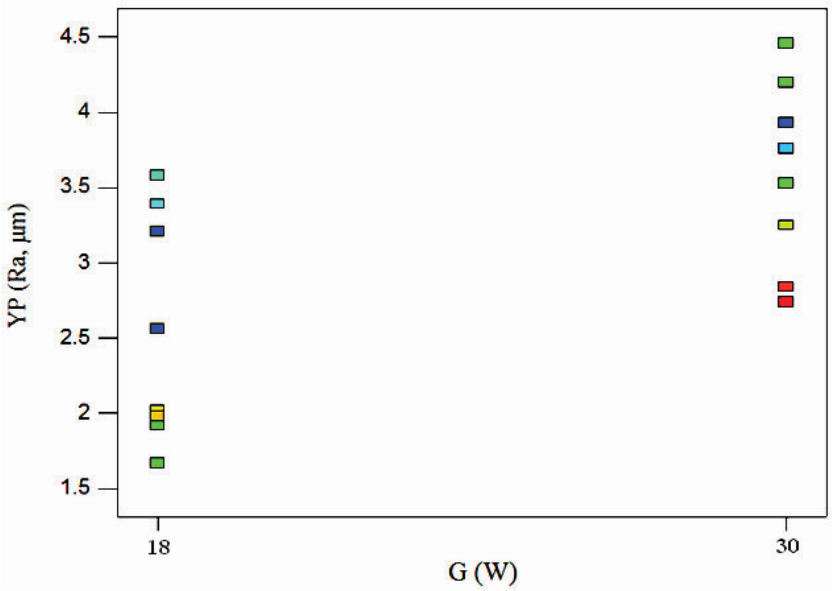
Şekil 6.60 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisinin tespitine yönelik işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi

6.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının Analizi

Şekil 6.61 – 64'de ve Şekil 6.66 – 69'da Tungsten Karbür malzeme için temel işlem parametrelerinin her bir değerinde ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.65'de ve Şekil 6.70'de ise temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir. Şekil 6.71 – 74'de ve Şekil 6.76 – 79'da işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerine etkisinin noktasal gösterimi görülmektedir. Şekil 6.75'de ve Şekil 6.80'de ise işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkisinin grafiksel gösterimi görülmektedir.

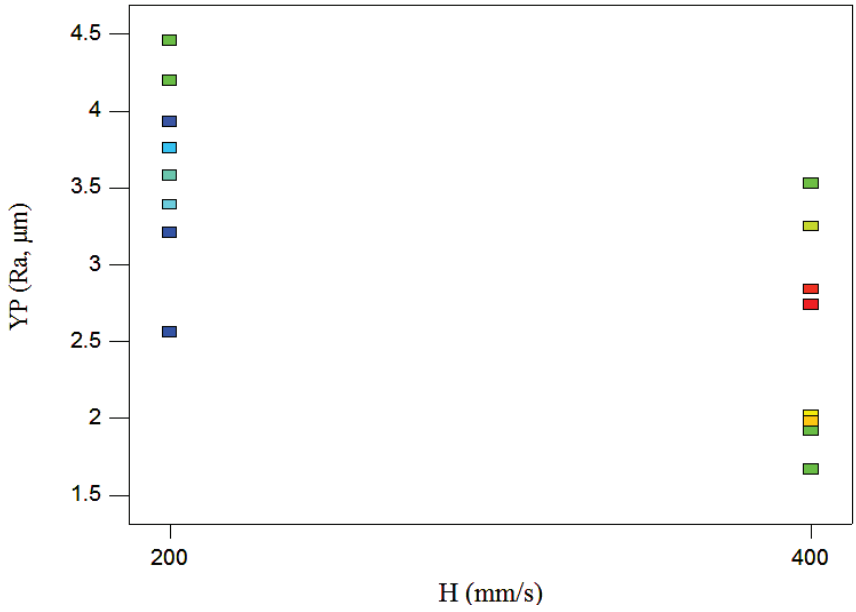
6.4.1 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.61'de Tungsten Karbür için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımındaki eğilime göre artan güçle birlikte yüzey pürüzlülüğü artış göstermektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü 30W etkin güçte tespit edilmiştir ve ölçülen değer 4,46µm'dur. Bununla birlikte en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 18W etkin güçte ölçülmüş ve ölçülen değer 1,67µm'dir. Şekil 6.65'deki grafiksel gösterimde aynı sonucu göstermektedir.



Şekil 6.61 Tungsten Karbür için gücün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.62'de Tungsten Karbür için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre artan tarama hızı yüzey pürüzlülüğünü azalmıştır ve ölçülen en düşük yüzey pürüzlüğü (1,67µm) 400mm/s'deki tarama hızında tespit edilmiştir. Şekil 6.65'deki grafiksel gösterimde de noktasal dağılımdakine benzer bir sonuç görülmektedir. Buna göre, artan tarama hızı yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana getirmektedir ve en düşük yüzey pürüzlülüğü 400mm/s'deki hızda tespit edilmiştir.

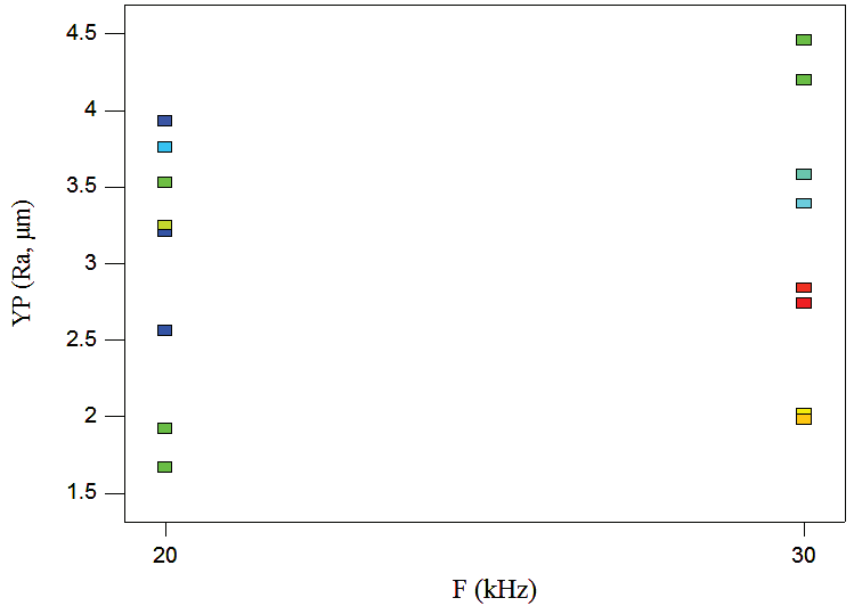


Şekil 6.62 Tungsten Karbür için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

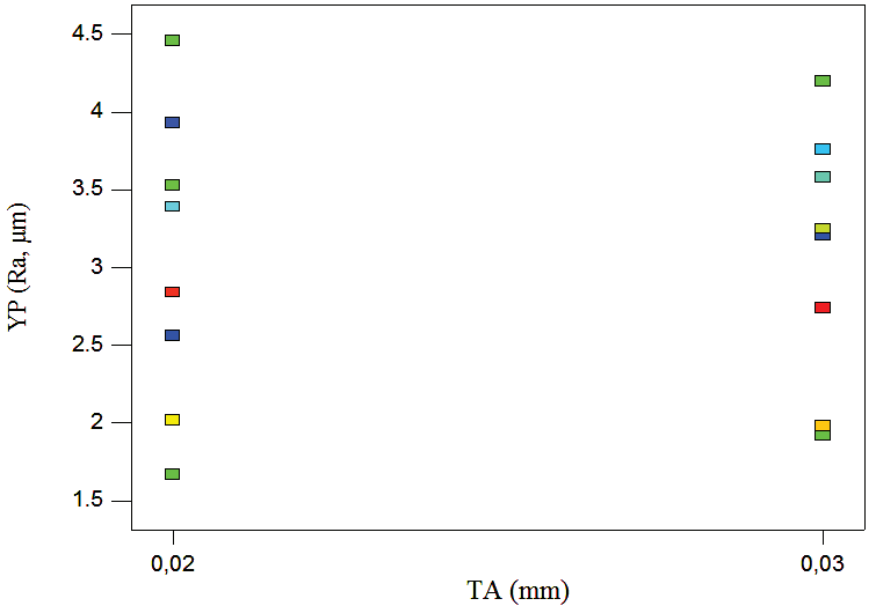
Şekil 6.63'de Tungsten Karbür için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, frekanstaki artış yüzey pürüzlülüğünde artış meydana getirmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 20kHz'de tespit edilmiştir ve ölçülen değer 1,67µm'dir. Şekil 6.65'deki grafiksel gösterime göre yüzey pürüzlülüğü artan frekansla artış göstermiştir. Hem noktasal dağılım hem de grafiksel gösterim aynı sonucu göstermektedir.

Şekil 6.64'de Tungsten Karbür için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri 0,02mm'de ölçülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerinden sonra gelen iki adet en düşük yüzey pürüzlülük değeri 0,03mm'deki tarama aralığına aittir ve değerleri 1,92µm ve 1,98µm'dir. Bununla birlikte 0,02mm'de ölçülen ikinci en küçük yüzey pürüzlülük değeri 2,02µm'dir. Görüldüğü gibi en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinden sonraki en

düşük üç değer birbirine çok yakındır. Şekil 6.65'deki grafiksel gösterimde noktasal dağılımdaki eğilime benzer bir eğilim göstermiştir ki görüldüğü gibi 0,02mm ve 0,03mm arasındaki değişim çok belirgin değildir. Bu sebepten tarama aralığının yüzey pürüzlüğü için önemli bir etkiye sahip olmadığı düşünülmektedir.



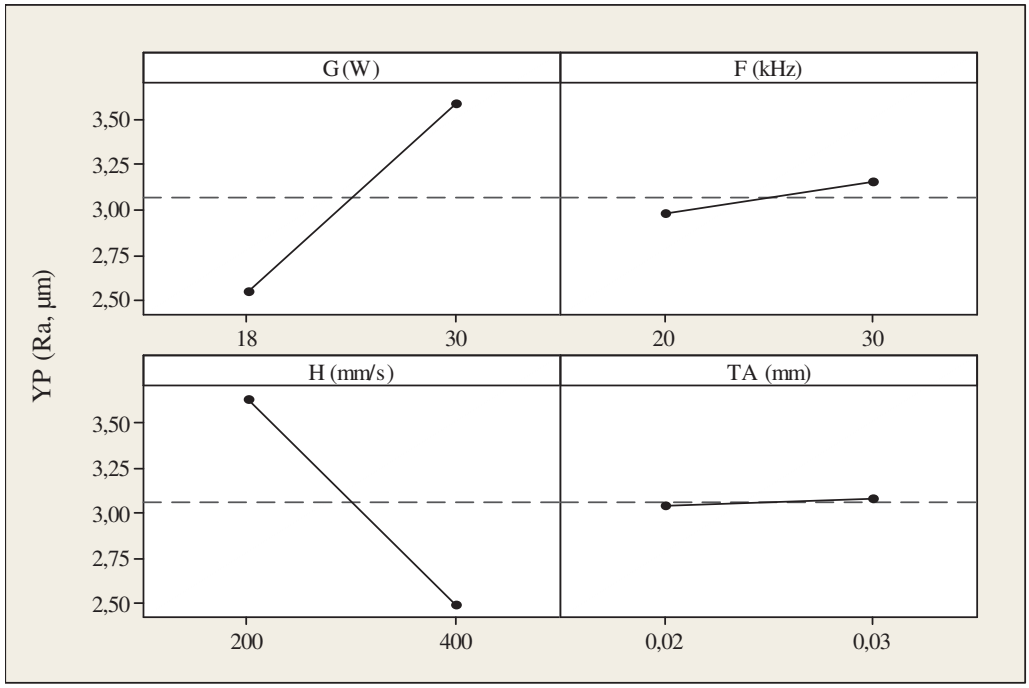
Şekil 6.63 Tungsten Karbür için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi



Şekil 6.64 Tungsten Karbür için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda hem noktasal hemde Şekil 6.65'deki grafiksel gösterimlere göre en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri etkin gücün 18W,

tarama hızının 400mm/s'de, frekansın 20kHz'de ve tarama aralığının 0,02mm'de olduğu oyma koşulunda tespit edilmiştir.



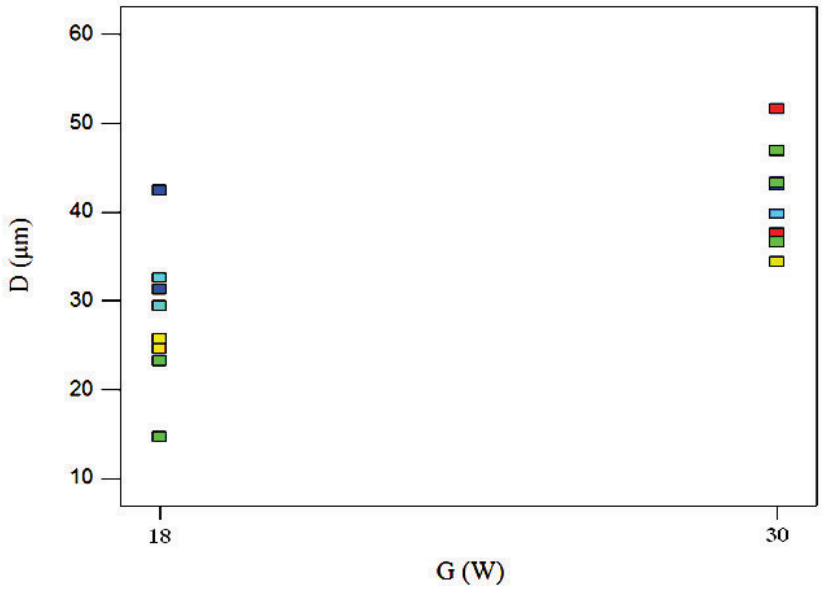
Şekil 6.65 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin grafiksel gösterimi

6.4.2 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin oyma derinliğine (D) etkisi

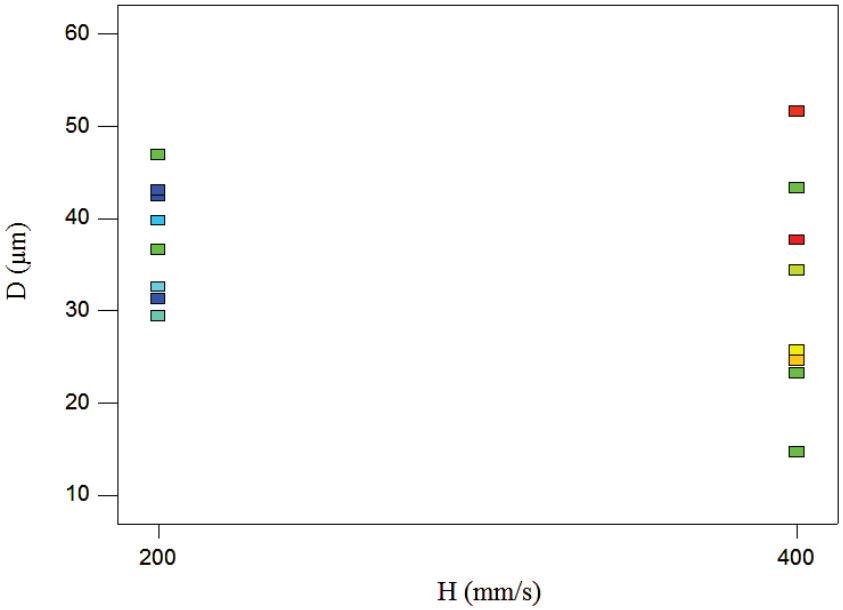
Şekil 6.66'da Tungsten Karbür için gücün oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, artan güçle birlikte oyma derinliği artış göstermiştir ve en yüksek oyma derinliği 30W etkin güçte ölçülmüştür. Gücün 30W olduğu şartlar için ölçülen en yüksek değer 51,62µm'dir. Bununla birlikte en düşük oyma derinliği değeri 18W etkin güçte ölçülmüştür ve ölçülen değer 14,7µm. Grafiksel gösterimde (Bkz. Şekil 6.70) aynı sonucu göstermektedir.

Şekil 6.67'de Tungsten Karbür için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, artan tarama hızı oyma derinliğinde azalma meydana getirmektedir ve en yüksek oyma derinliği 200mm/s'deki tarama hızında ölçülmüştür. Tarama hızının 200mm/s olduğu şartlar için ölçülen en yüksek değer 51,62µm'dir. Bununla birlikte en

düşük oyma derinliği değeri 400mm/s'deki tarama hızında ölçülmüştür ve ölçülen değer 14,7µm. Şekil 6.70'deki grafiksel gösterimde aynı sonucu göstermektedir.



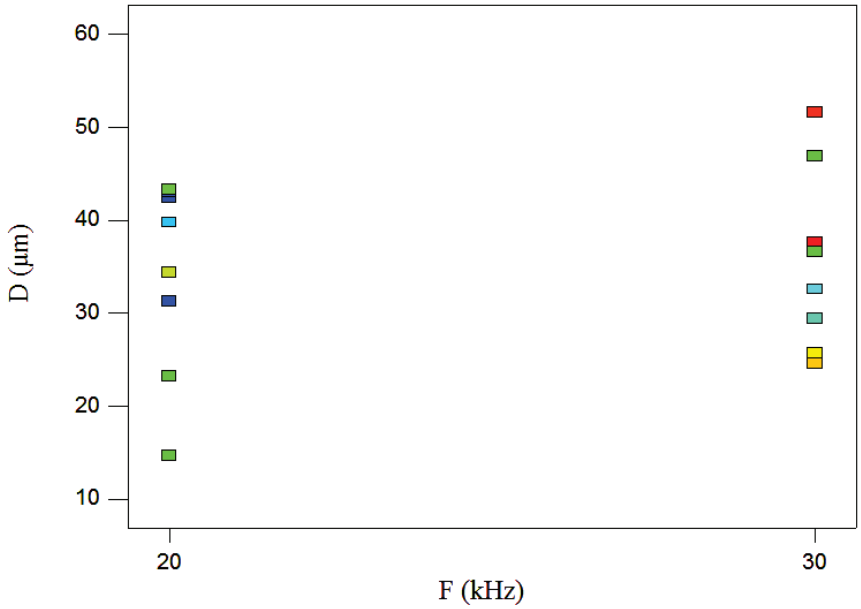
Şekil 6.66 Tungsten Karbür için gücün oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.67 Tungsten Karbür için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi

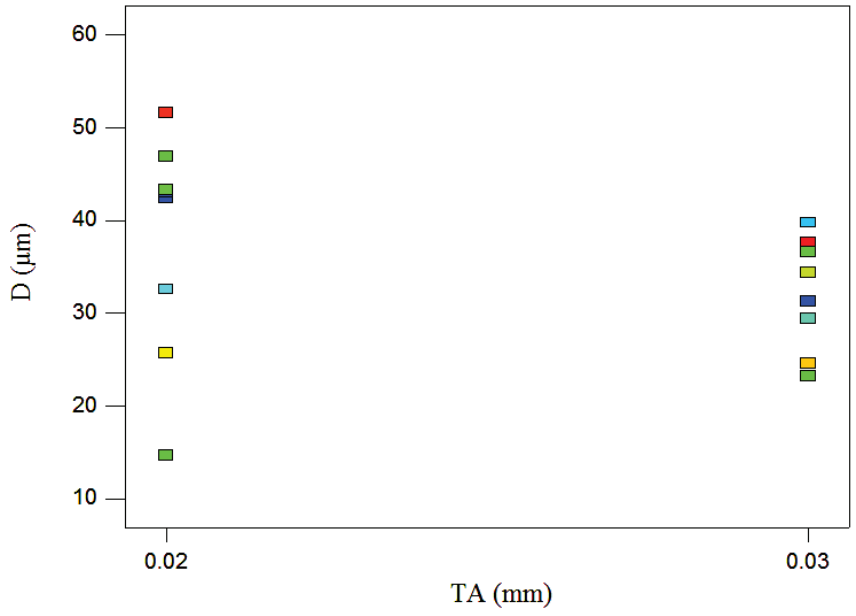
Şekil 6.68'de Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, artan frekans oyma derinliğinde azalma meydana getirmektedir ve en yüksek oyma derinliği 20 kHz'deki frekansta ölçülmüştür. Frekansın 20kHz olduğu şartlar için ölçülen en yüksek değer 51,62µm'dir. Bununla birlikte en düşük oyma derinliği değeri

30kHz'deki frekansta ölçülmüştür ve ölçülen değer 14,7µm. Şekil 6.70'deki grafiksel gösterimde aynı sonucu göstermektedir.

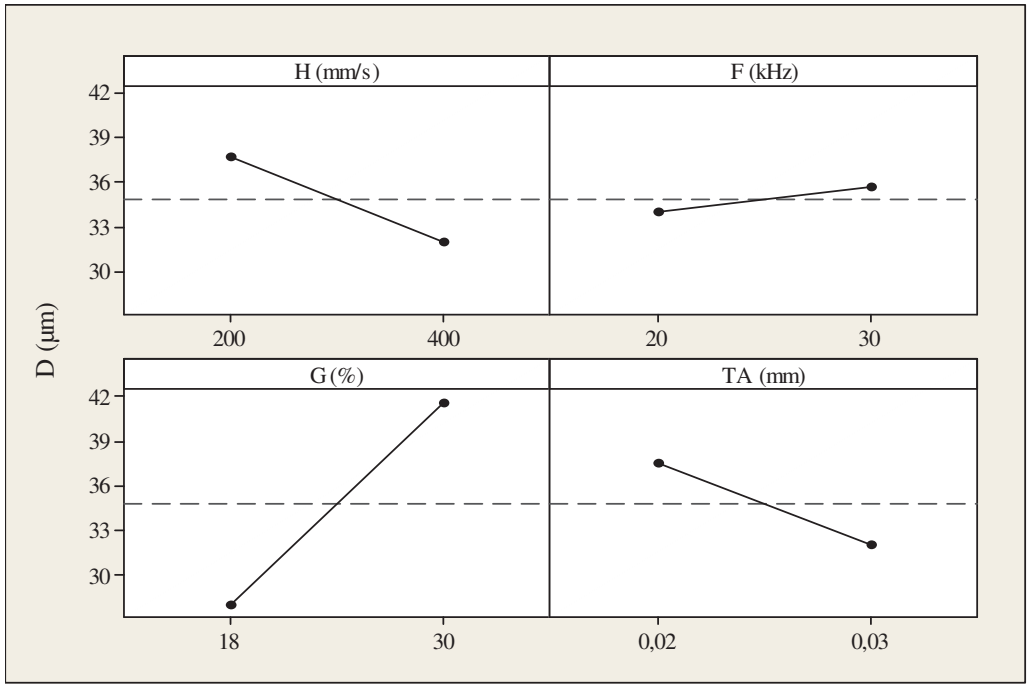


Şekil 6.68 Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.69'da Tungsten Karbür için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. En yüksek ve en düşük oyma derinliği değerleri 0,02mm'de tespit edilmiştir. Grafiksel gösterim (Bkz. Şekil 6.70) deki eğilim artan tarama aralığının oyma derinliğini düşürdüğü yönündedir.



Şekil 6.69 Tungsten Karbür için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi

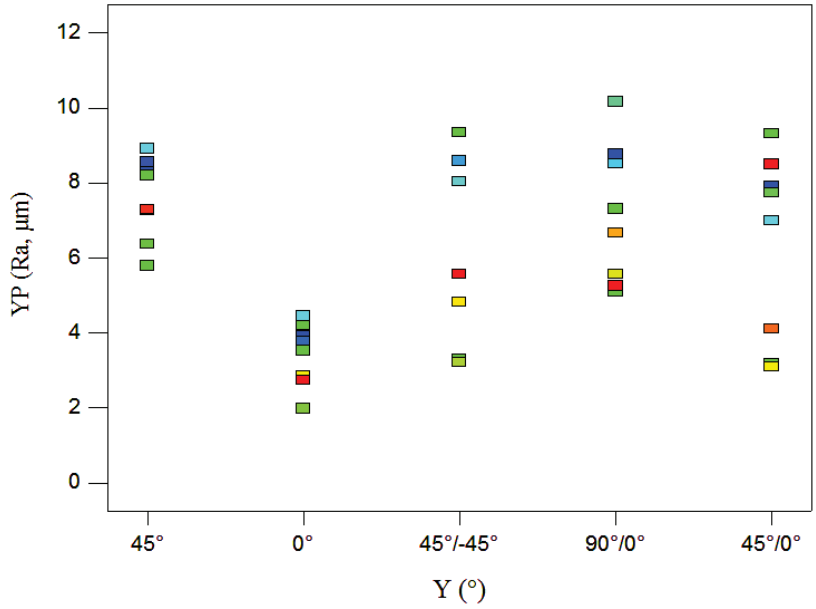


Şekil 6.70 Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin oyma derinliğine (D) etkisinin grafiksel gösterimi

Tungsten Karbür için temel işlem parametrelerinin etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda hem noktasal hem de Şekil 6.70'deki grafiksel gösterimlere göre en yüksek oyma derinliği değeri etkin gücün 30W, tarama hızının 200mm/s'de, frekansın 30kHz'de ve tarama aralığının 0,02mm'de olduğu oyma koşulunda tespit edilmiştir.

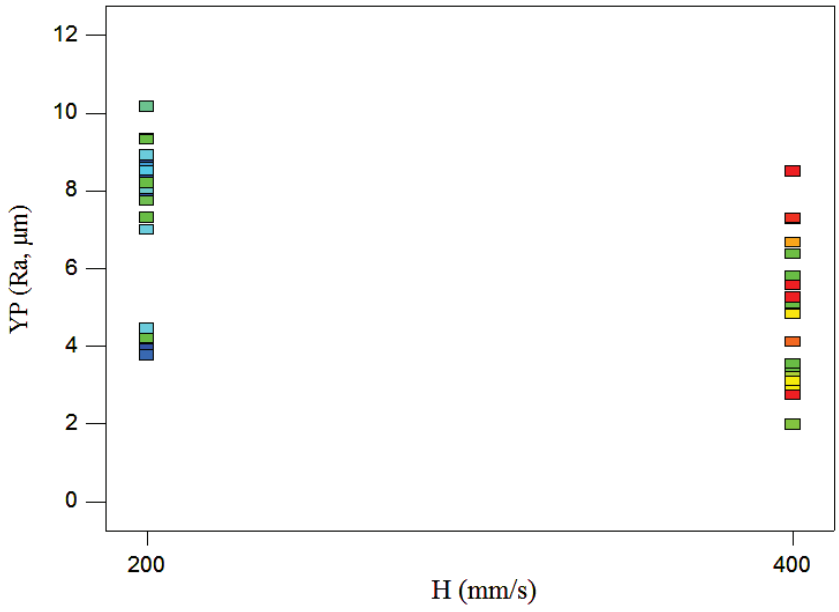
6.4.3 Tungsten Karbür için yüzey işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.71'de Tungsten Karbür için yüzey işlem tarama yönünün tespitine yönelik yapılan oyma işleminde parametrelerden işleme yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına göre, en düşük yüzey pürüzlülüğü 0°'deki ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü 90°/0°'deki tarama yönünde tespit edilmiştir. Bu işleme yönlerinde ölçülen en düşük yüzey pürüzlülüğü 1,98µm ve en yüksek yüzey pürüzlülüğü 10,17µm'dir. Şekil 6.75'deki grafiksel gösterimde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerinin 0°'deki tarama yönünde ve en yüksek yüzey pürüzlülüğünün 45°'deki tarama yönünde olduğu görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü için noktasal ve grafiksel gösterimdeki farklılık, grafiksel gösterimde dataların ortalama değerlerine göre grafiğin çizilmiş olmasından kaynaklanmaktadır.



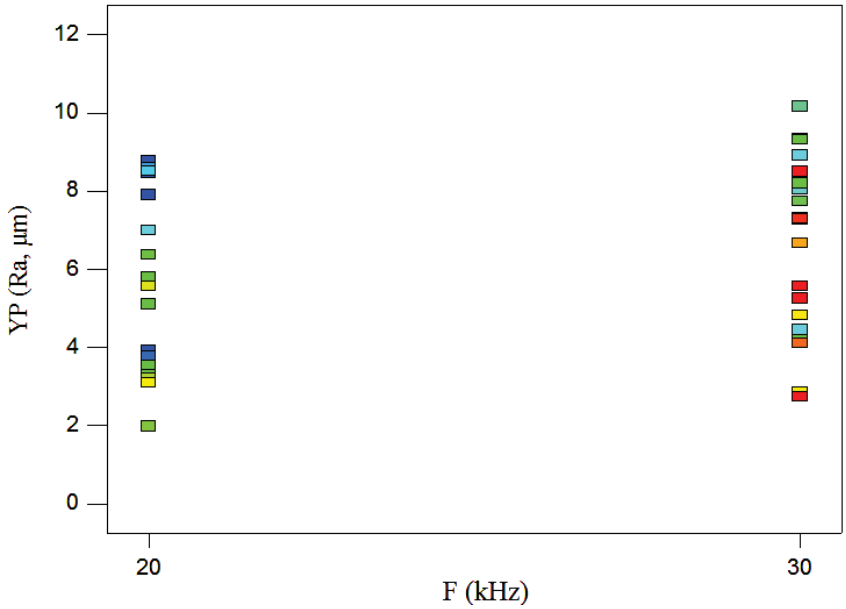
Şekil 6.71 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.72'de Tungsten Karbür için tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılımdaki eğilim artan hızla birlikte yüzey pürüzlülüğünde azalmanın meydana geldiği yönündedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 400mm/s'de elde edilmiştir ve bu hızda ölçülen en düşük yüzey pürüzlülük değeri 1,98µm. Noktasal dağılımda elde edilen sonuç Şekil 6.75'deki grafiksel gösterimdeki sonuçla paralellik göstermektedir.



Şekil 6.72 Tungsten Karbür için işlem tarama hızının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

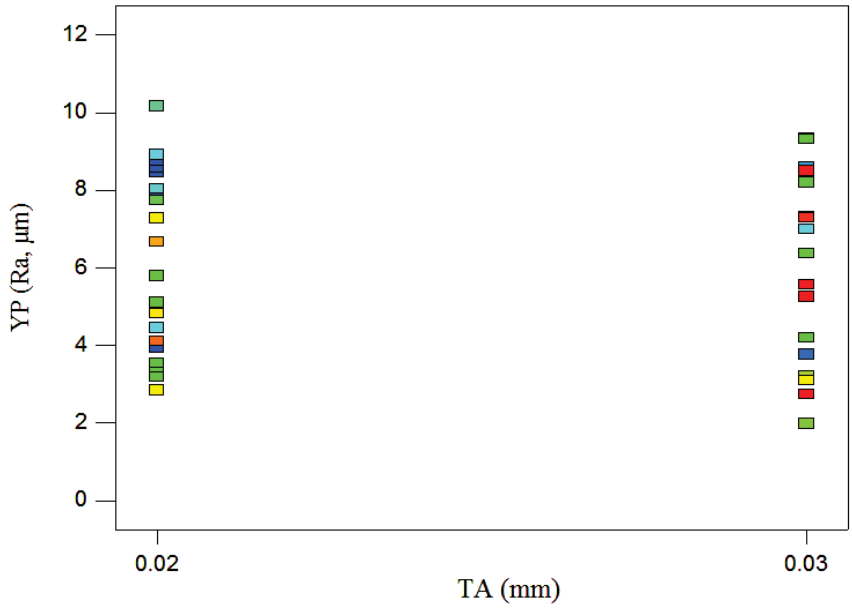
Şekil 6.73'de Tungsten Karbür için frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılıma göre, artan frekansın yüzey pürüzlülüğünde artış meydana getirdiği görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 20kHz'de tespit edilmiştir ve ölçülen değer 1,98µm'dir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 30kHz'de ölçülmüştür. Noktasal dağılımda elde edilen sonuç Şekil 6.75'deki grafiksel gösterimdeki sonuçla paralellik göstermektedir.



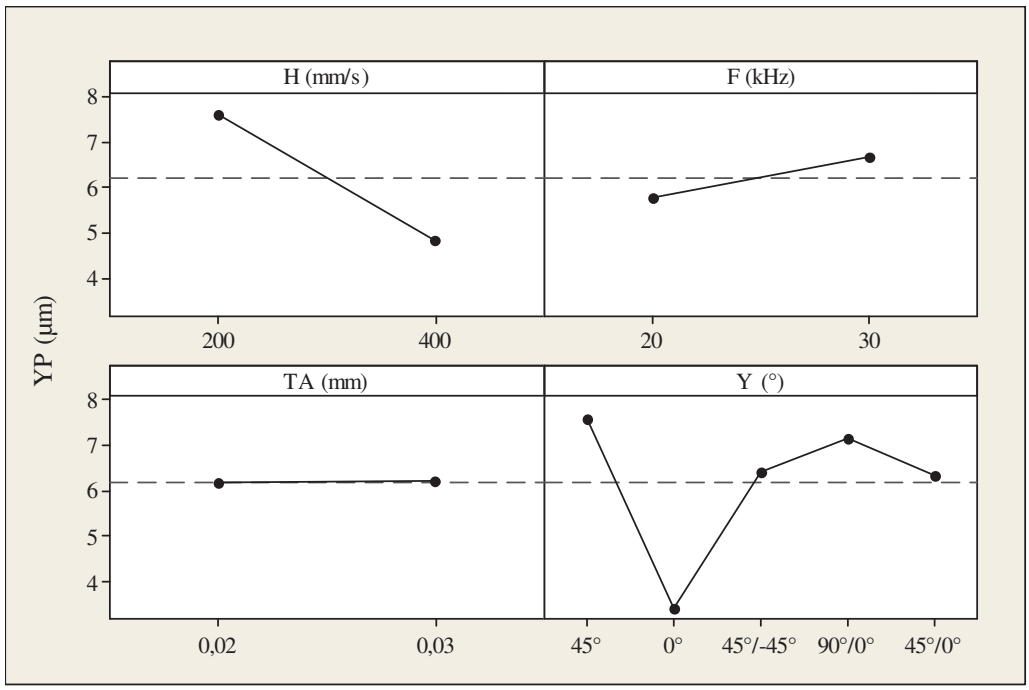
Şekil 6.73 Tungsten Karbür için işlem frekansın yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

Şekil 6.74'de Tungsten Karbür için tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. En düşük yüzey pürüzlülüğü 0,03mm'deki tarama aralığında ölçülmüştür. Tarama aralığının Şekil 6.75'deki grafiksel gösterimi incelendiğinde iki farklı tarama aralığı için ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ortalamaları arasındaki fark (değişim) çok küçüktür. Bu durum yüzey işleme yönünün etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işleminde, tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü için belirgin bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir.

Tungsten Karbür için yüzey işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü 0°'deki tarama yönünde, 800mm/s'deki tarama hızında, frekansın herhangi bir değerinde (30,40kHz) ve 0,02mm'deki tarama aralığında tespit edilmiştir.



Şekil 6.74 Tungsten Karbür için işlem tarama aralığının yüzey pürüzlülüğüne (YP) etkisi

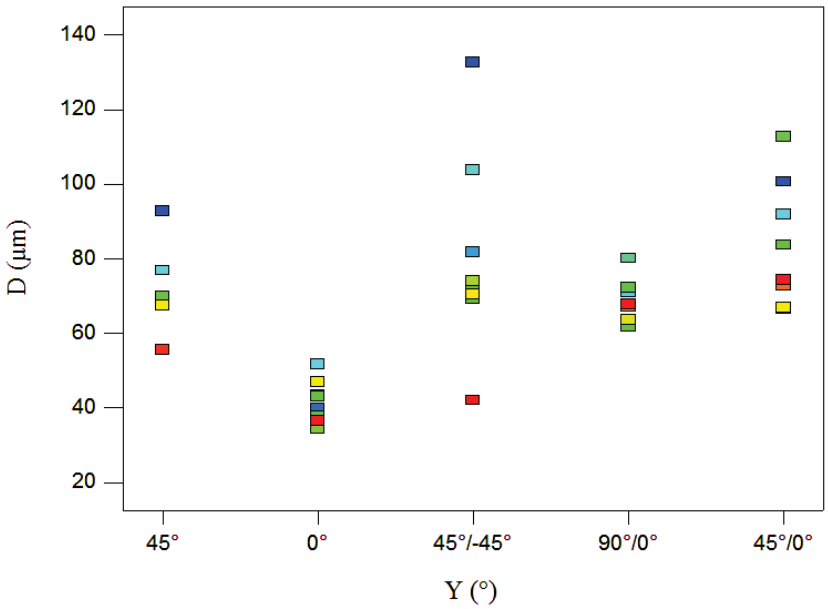


Şekil 6.75 Tungsten Karbür için yüzey işleme yönünün etkisinin tespitine yönelik yüzey pürüzlülüğüne işlem parametrelerinin grafiksel gösterimi

6.4.4 Tungsten Karbür için yüzey işleme yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.76'da Tungsten Karbür için yüzey işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktaların dağılımına

göre, en düşük oyma derinliği 0°'deki ve en yüksek oyma derinliği 45°/-45°'deki tarama yönünde tespit edilmiştir. Buna göre en düşük oyma derinliği 34,42µm ve en yüksek oyma derinliği 132,6µm'dir. Şekil 6.80'deki grafiksel gösterim, en düşük oyma derinliği değerini 0°'deki tarama yönünde ve en yüksek oyma derinliği değerini 45°/0°'deki tarama yönünde göstermiştir. En yüksek oyma derinliği için noktasal ve grafiksel gösterimde farklılık tespit edilmiştir ve bu farklılık grafiksel gösterimde grafiğin, ölçülen sonuçların ortalama değerlerine göre çizilmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak grafiksel gösterimde 45°/0° ve 45°/-45°'deki tarama yönleri için ölçülen değerlerin ortalamaları arasında belirgin bir fark görülmemektedir. Bu sebepten noktasal dağılımda elde edilen sonuç grafiksel gösterimdeki sonuçla paralellik göstermektedir denilebilir.

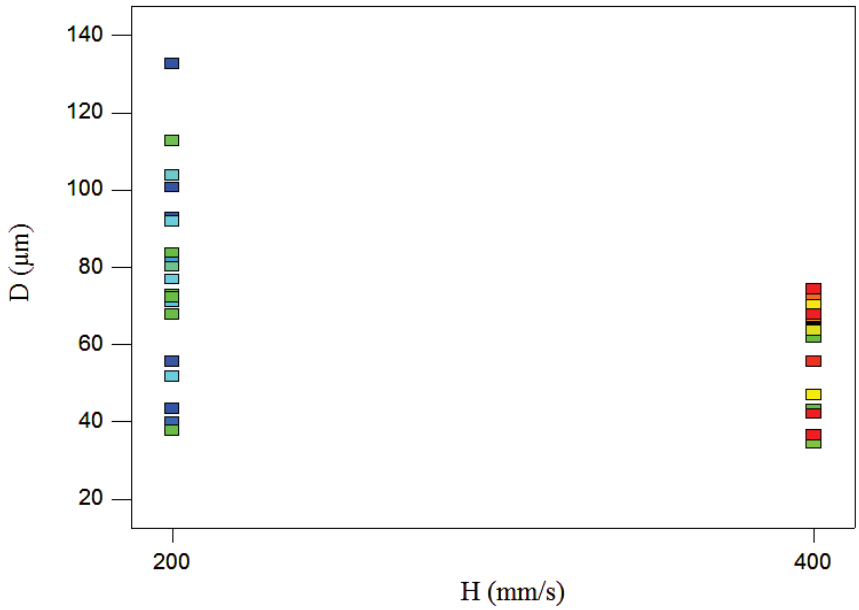


Şekil 6.76 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine (D) etkisi

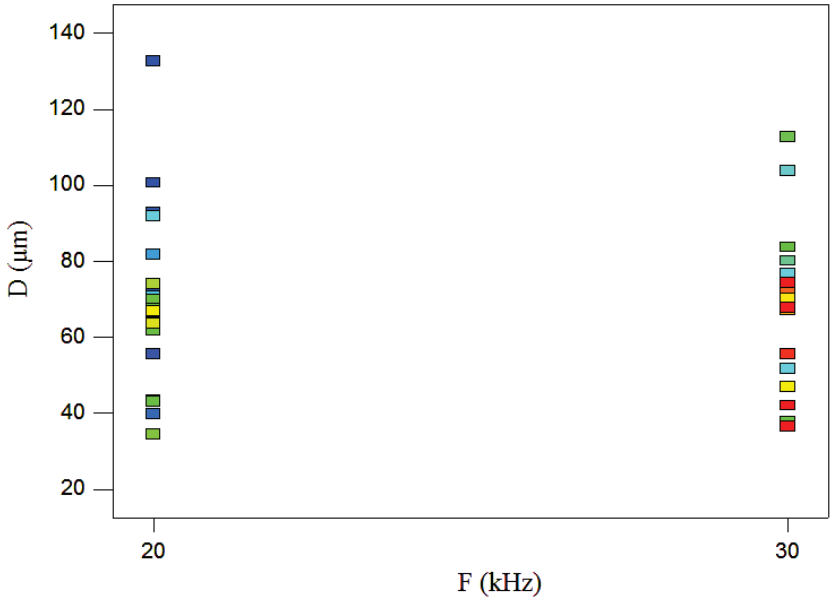
Şekil 6.77'de Tungsten Karbür için tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılımdaki eğilim artan hızla birlikte oyma derinliğinin azaldığı yönündedir. En yüksek oyma derinliği 200mm/s'de meydana gelmiştir ve bu hızda ölçülen en yüksek oyma derinliği değeri 132,6µm'dir. En düşük oyma derinliği 400mm/s'de elde edilmiş ve bu hızda ölçülen en düşük oyma derinliği değeri 34,42µm'dir. Noktasal dağılımda elde edilen sonuç, Şekil 6.75'deki grafiksel gösterimdeki sonuçla paralellik göstermektedir.

Şekil 6.78'de Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılıma göre, artan frekansın oyma

derinliğinde azalma meydana getirdiği görülmektedir. En düşük oyma derinliği 30kHz'de tespit edilmiştir ve ölçülen değer 34,42µm'dir. En yüksek oyma derinliği değeri 20kHz'de ölçülmüştür ve ölçülen değer 132,6µm'dir. Noktasal dağılımda elde edilen sonuç grafiksel gösterimdeki (Bkz. Şekil 6.76) sonuçla paralellik göstermektedir.



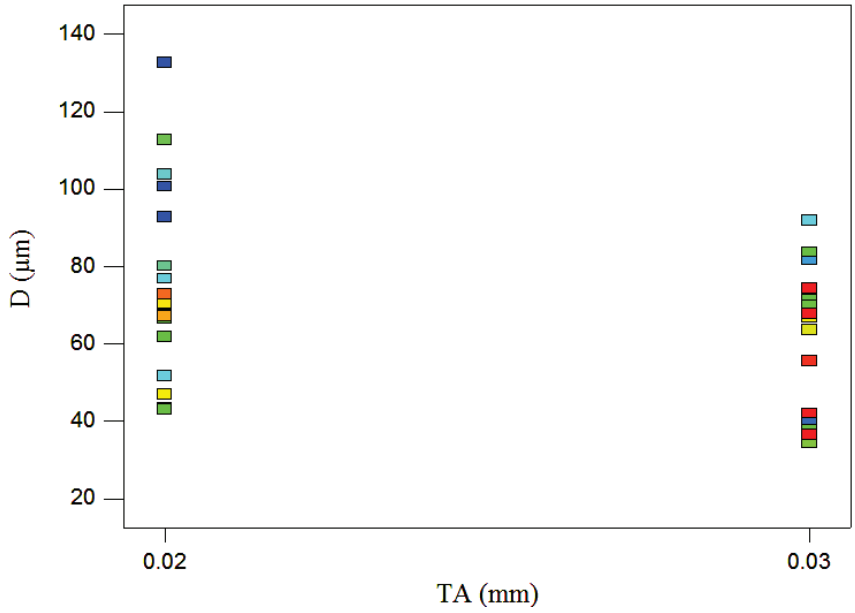
Şekil 6.77 Tungsten Karbür için işlem tarama hızının oyma derinliğine (D) etkisi



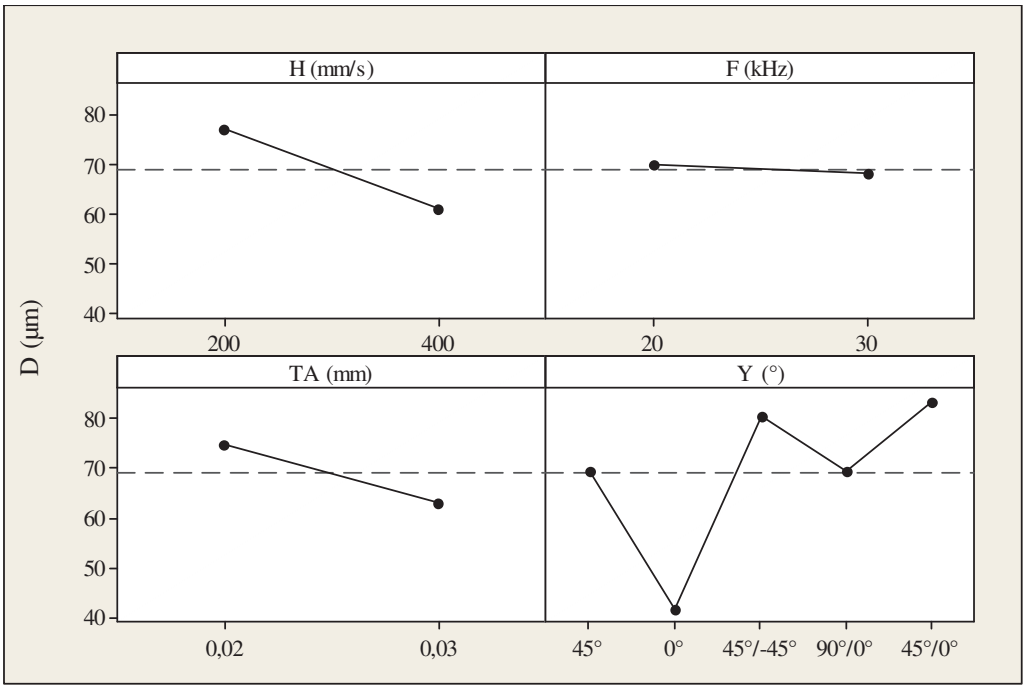
Şekil 6.78 Tungsten Karbür için frekansın oyma derinliğine (D) etkisi

Şekil 6.79'da Tungsten Karbür için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisinin noktasal dağılımı görülmektedir. Noktasal dağılıma göre, artan tarama

aralığının oyma derinliğinde azalma meydana getirdiği görülmektedir. En düşük oyma derinliği 0,03mm'de tespit edilmiştir ve ölçülen değer 34,42µm'dir. En yüksek oyma derinliği değeri 0,02'de ölçülmüştür ve ölçülen değer 132,6µm'dir. Noktasal dağılımda elde edilen sonuç Şekil 6.80'deki grafiksel gösterimdeki sonuçla paralellik göstermektedir.



Şekil 6.79 Tungsten Karbür için tarama aralığının oyma derinliğine (D) etkisi



Şekil 6.80 Tungsten Karbür için yüzey işleme yönünün tespitine yönelik yapılan oyma işlem parametrelerinin oyma derinliğine (D) etkisinin grafiksel gösterimi

Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine etkisinin tespitine yönelik yapılan oyma işlemi sonucunda hem noktasal hem de grafiksel gösterimler göstermiştir ki en yüksek oyma derinliği işleme yönünün 45°/0°'de, tarama hızının 200mm/s'de, frekansın herhangi bir değerinde (20kHz) ve tarama aralığının 0,02mm'de olduğu oyma koşulunda tespit edilmiştir.

6.5 En Küçük Yüzey Pürüzlülüğü ve En Büyük Oyma Derinliği Değeri için Parametrelerin Optimum Değerleri

Lazerle derin oyma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkilerinin incelenmesi sonucunda en küçük yüzey pürüzlülüğü ve en büyük oyma derinliği için her bir malzemeye ait oyma parametrelerinin belirlenen değerleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de sırasıyla listelenmiştir.

Optimum parametrelerden 30W etkin güç için SEM çalışmaları ile yüzey incelemeleri yapılmıştır. Yüzey fotoğraflarıyla pürüzlülük grafikleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.1 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen değerleri

Parametre	AISI H13	AISI 316	AA 7075	Tungsten Karbür
Hız (mm/s)	800	800	800	400
Etkin Güç (W)	18	18	18	18
Frekans (kHz)	20	20	20 - 40	20
Tarama aralığı (mm)	0.03	0.03	0.03	0.02-0.03

Çizelge 6.2 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerinin seçilen değerleri

Parametre	AISI H13	AISI 316	AA 7075	Tungsten Karbür
Hız (mm/s)	200	200	200	200
Etkin Güç (W)	30	30	30	30
Frekans (kHz)	40	40	40 - 20	30
Tarama aralığı (mm)	0.02	0.02	0.02	0.02

6.5.1 AISI H13 takım çeliği için yüzey analizi

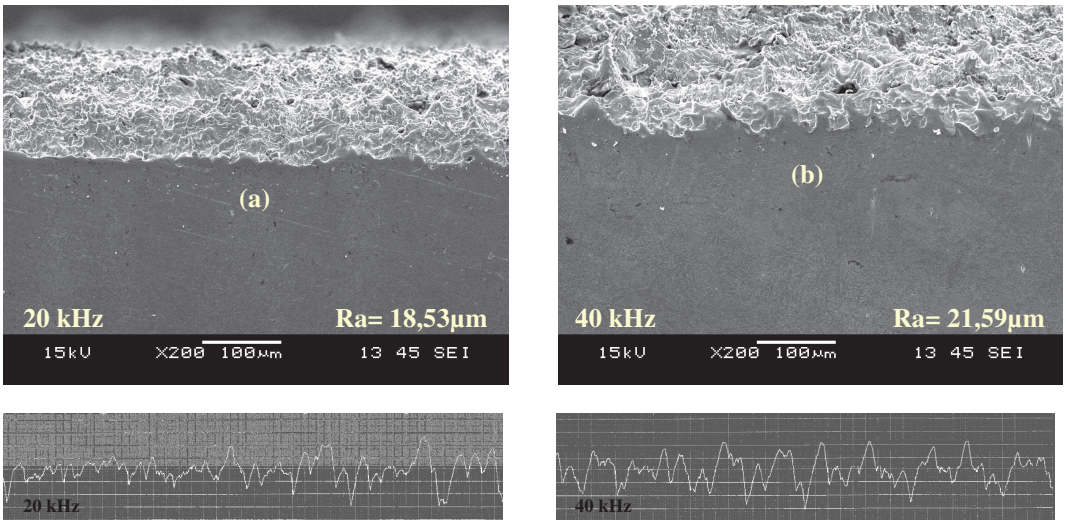
Şekil 6.81'de güç 30W'ta ve hız 200mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 40kHz'deki frekanslarla AISI H13 takım çeliğine yapılan oyma işlemleri

sonunda SEM yüzey kesit görüntüleriyle birlikte yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. SEM fotoğrafları incelendiğinde, 40kHz'de yüzeyde daha fazla derinlikte kabartılar görülmektedir. Bu şartlarda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ilgili fotoğrafın üzerinde görülebilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde 40kHz'deki pürüzlülük değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki fark 3,06µm'dir ve değişim de %16,51'dir.

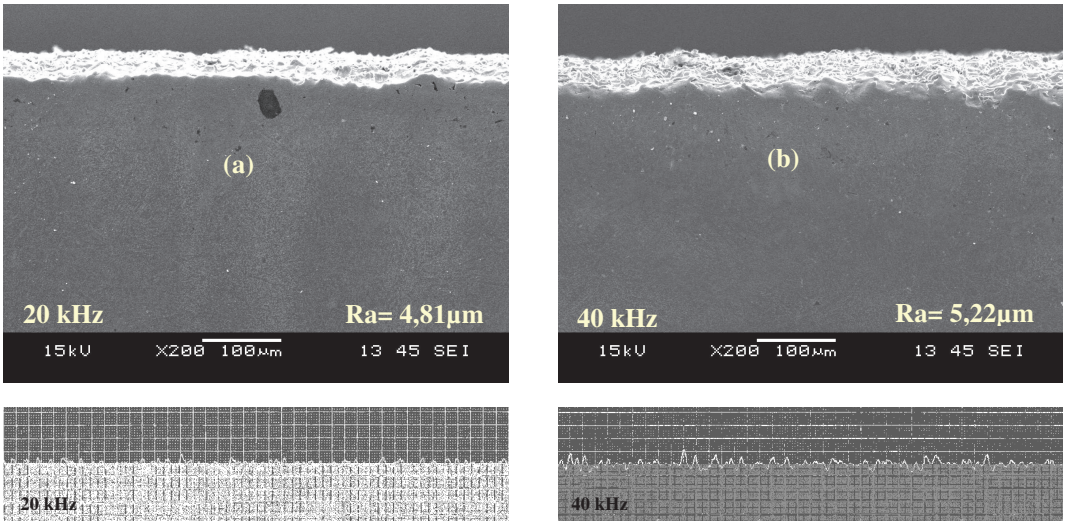
Şekil 6.81'deki yüzey pürüzlülük grafiklerindeki girinti ve çıkıntıların derinlikleri incelendiğinde, 40kHz'deki girinti ve çıkıntıların derinliklerinin 20kHz'dekine göre daha büyük olduğu net bir şekilde görülebilmektedir.

Şekil 6.82'de güç 30W'ta ve hız 800mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 40kHz frekanslarda yapılan oyma işlemleri sonunda SEM incelemeleri ile yüzey ve kesit görüntülerinin birlikte fotoğrafları ile yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. Yüzey profili incelendiğinde belirgin bir farklılık görsel olarak görülememektedir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülük grafiğinde de ayırt edilebilir bir farklılık görülememiştir ve bu durum yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının rakamsal değerlerinde de görülebilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) neredeyse aynı sonucu vermiştir. Yüzey pürüzlülükleri arasındaki fark 0,41 ve değişim ise %8,52'dir. Görüldüğü gibi hem fark hem de değişim oldukça küçüktür. Bu sonuç, artan hızda frekansa bağlı yüzey pürüzlülükleri arasındaki değişimlerin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.81a'daki ve Şekil 6.82a'daki yüzey profili incelendiğinde Şekil 6.81a'daki yüzey profilindeki girinti – çıkıntıların daha kaba ve oyukların daha belirgin olduğu görülmektedir ve bu yüzeyin pürüzlülük değeri de neredeyse 4 kat daha büyüktür. Bu iki profilin oluşumuna sebep olan tek değişken tarama hızıdır. Şekil 6.81a'daki tarama hızı 200mm/s iken Şekil 6.82a'daki tarama hızı 800mm/s'dir. Benzer durum Şekil 6.81b ile Şekil 6.82b arasında da görülmektedir. Bu iki profilde de tek değişken hızdır.



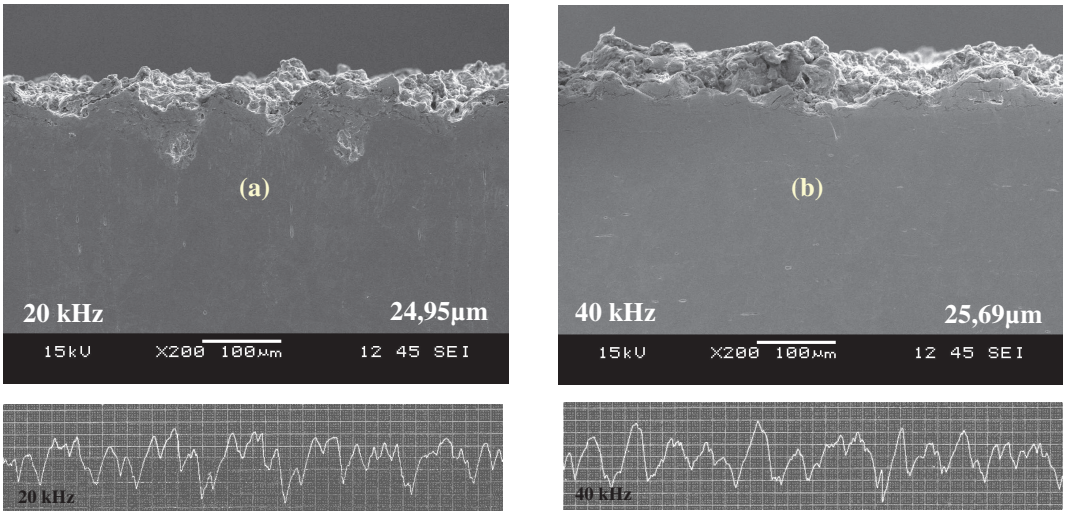
Şekil 6.81 Farklı frekansta AISI H13 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yüzey analizi



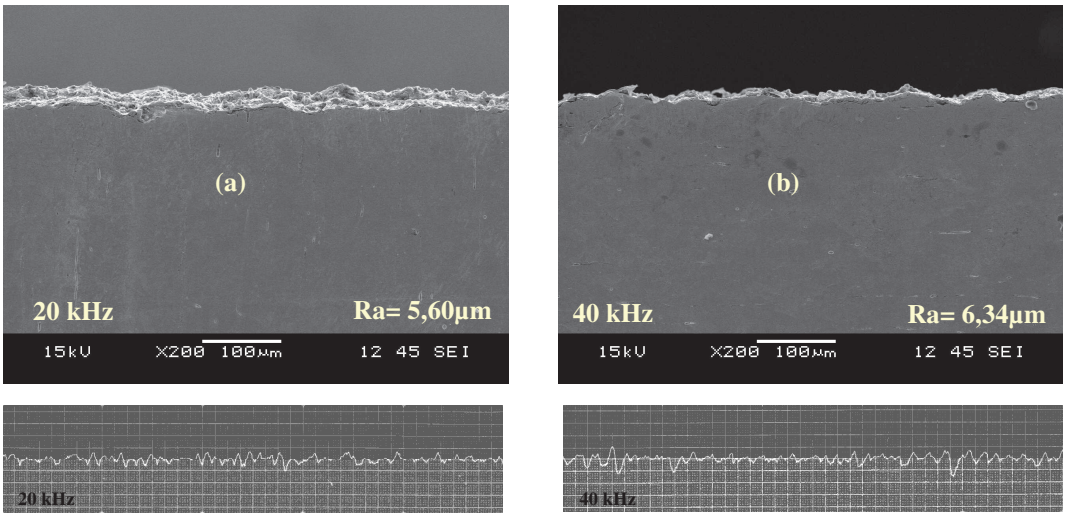
Şekil 6.82 Farklı frekansta AISI H13 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yüzey analizi

6.5.2 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey analizi

Şekil 6.83'de yüzeyi, etkin güç 30W'ta ve hız 200mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 40kHz'deki frekanslarla işlenmiş AISI 316 paslanmaz çeliğinin yüzey kesit görüntüleri ve yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. SEM incelemelerine ait görüntülerde, yüzey profillerinde belirgin bir farklılık tespit edilememiştir. Yüzey pürüzlülük grafiği ve ölçüm sonucunun rakamsal değeri de SEM görüntülerini destekleyen sonuçları vermiştir.



Şekil 6.83 Farklı frekansta AISI 316 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yüzey analizi



Şekil 6.84 Farklı frekansta AISI 316 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yüzey analizi

Şekil 6.84'de güç 30W'ta ve hız 800mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 40kHz frekanslarda yapılan oyma işlemleri sonunda SEM incelemelerinde çekilmiş yüzey ve kesit fotoğrafları ile yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. Yüzey profili incelendiğinde belirgin bir farklılık görsel olarak görülememektedir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülük grafiğinde de ayırt edilebilir bir farklılık görülememiştir ve bu durum yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarının rakamsal karşılıklarında da görülebilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) neredeyse aynı sonucu vermiştir.

Tarama hızındaki artışın yüzey profilinde de iyileşme sağladığı fotoğraflardan net olarak görülebilmektedir. 800mm/s ve 200mm/s'deki yüzey

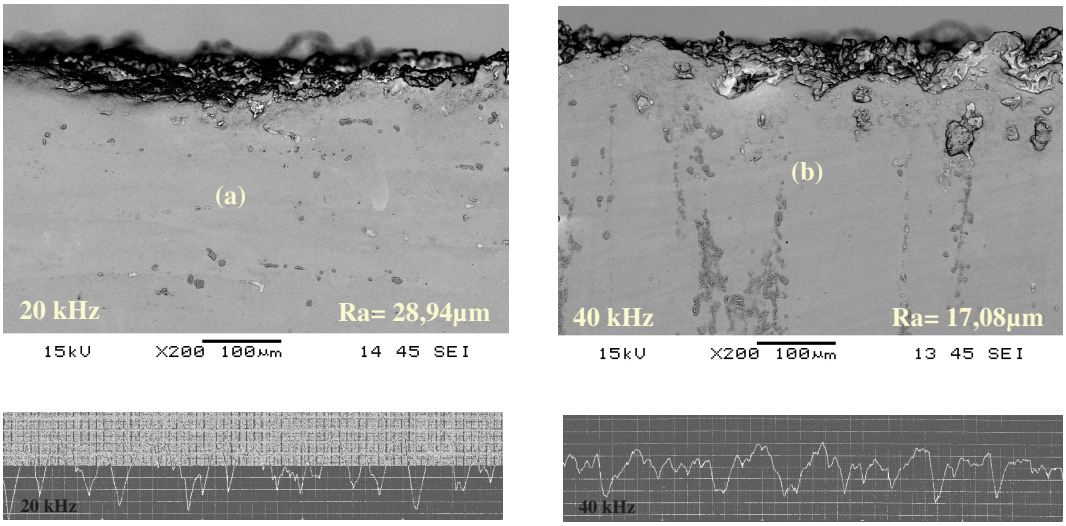
pürüzlülük grafikleri incelendiğinde 800mm/s'deki grafikteki girinti – çıkıntı yüksekliklerindeki azalma görülmektedir ki rakamsal olarak da pürüzlük değerlerinde azalma bu sonucu desteklemektedir. Şekil 6.83a ve Şekil 6.84a'da görüldüğü gibi artan hızla birlikte %80'lik bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Benzer durum, Şekil 6.83b ve Şekil 6.84b'deki görüntülerde ve rakamsal değerlerde de tespit edilmiştir. Hızdaki artışla birlikte atım çakışma oranında meydana gelen azalma yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlamıştır.

6.5.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey analizi

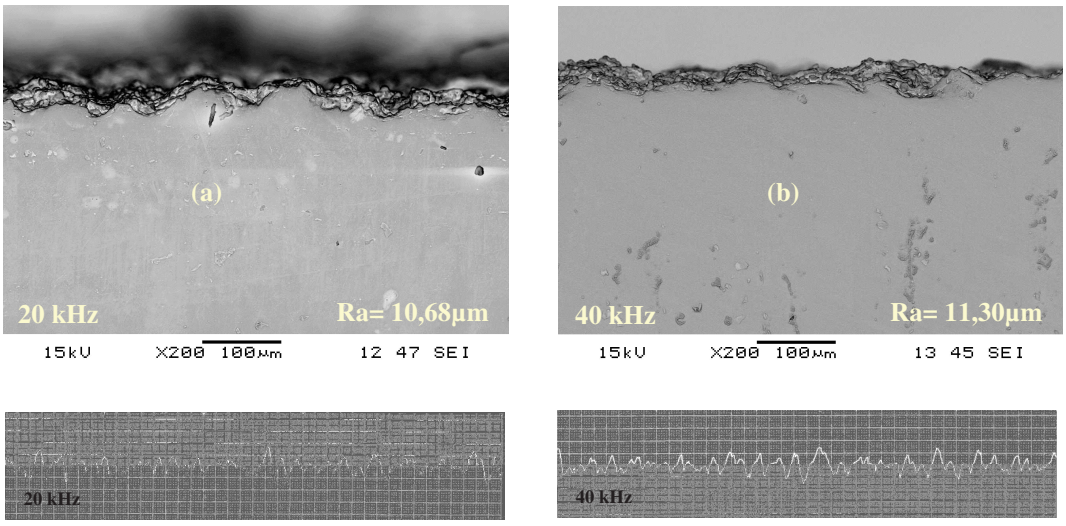
Şekil 6.85'de güç 30W ve hız 200mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 40kHz'deki frekanslarla AA 7075 alüminyum alaşımı için yapılan oyma işlemleri sonunda SEM yüzey kesit görüntüleri ile birlikte yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. Şekil 6.85'deki yüzey profili incelendiğinde görsel olarak belirgin bir fark gözlenemese de yüzey pürüzlülük grafiğinde girinti ve çıkıntıların derinliklerinde farklılıklar görülmektedir. Bu farklılık yüzey pürüzlülük değeriyle de rakamsal olarak ortaya konmuştur. Bu iki resim ve grafikteki tek değişken frekanstır ve görüldüğü üzere frekans yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişim yaratmıştır.

Şekil 6.86'da 800mm/s'de yapılan oyma sonrası yüzey profilinde belirgin bir değişim görülmezken, frekans yüzey pürüzlülüğünde ihmal edilebilir bir değişim göstermiştir. Şekil 6.85 ve 86'daki iki koşulda değişen sadece tarama hızıdır ve tarama hızı arttıkça frekansın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkinliği de belirgin bir azalma göstermektedir. Hızın yüksek olduğu koşulda frekansın her iki değeri için yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, 200mm/s'deki yüzey pürüzlülükleri değerlerine göre çok belirgin bir azalma gösterdiği tespit edilmiştir.

Şekil 6.85'de frekansa bağlı yüzey pürüzlülüğü değişiminin grafiksel gösterinde artan frekansın yüzey pürüzlülüğünde meydana getirdiği değişim çok belirgin değildir. Yüzey pürüzlülüklerinin rakamsal değerleri arasındaki fark 10,15µm ve değişim %51'dir. 800mm/s'deki tarama hızı için yüzey pürüzlülüğündeki değişim %5,8'dir.



Şekil 6.85 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yüzey analizi

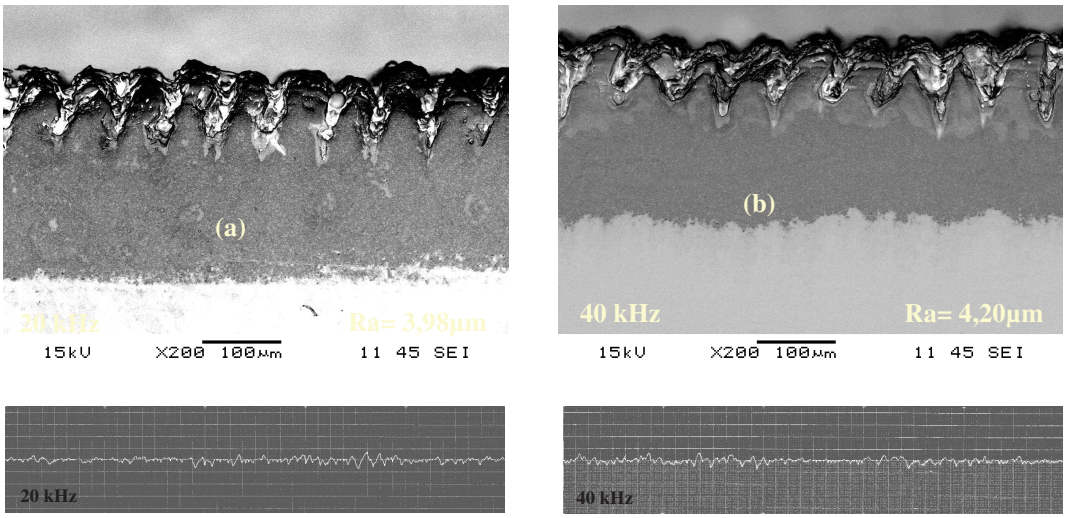


Şekil 6.86 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için yüzey analizi

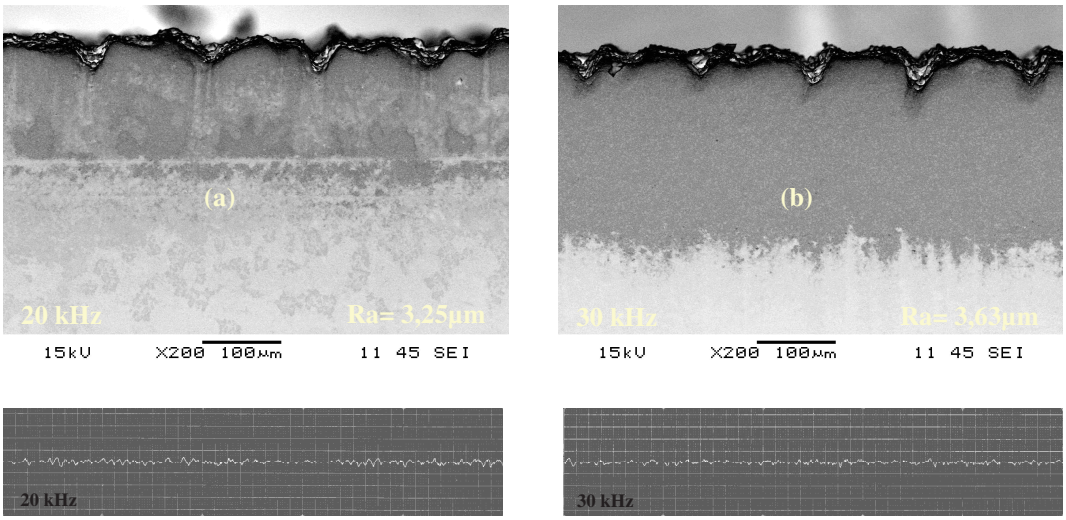
6.5.4 Tungsten Karbür için yüzey analizi

Şekil 6.87'de güç 30W'ta ve hız 200mm/s'de sabit kalmak koşulu ile 20kHz ve 30kHz'deki frekanslarla Tungsten Karbür için yapılan oyma işlemleri sonunda SEM yüzey kesit görüntüleriyle birlikte yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. SEM fotoğrafları incelendiğinde yüzeyde frekansın meydana getirdiği belirgin bir değişiklik görülememektedir. Yüzey pürüzlülük grafiklerinde ve yüzey pürüzlülüğünün rakamsal değerlerinde de benzer bir sonuç çıkmıştır. Yüzey pürüzlülük grafikleri nerdeyse aynı pürüzlülük profilini vermiştir ve bu profillerin rakamsal değerleri de birbirine çok yakındır. Şekil 6.87a Şekil 6.88a'da 200mm/s için, frekansa bağlı yüzey pürüzlülükleri arasındaki fark 0,22µm'dir ve frekans

yüzey pürüzlülüğünde %5,53'lük bir değişim meydana getirmiştir. Buna göre, frekansın yüzey pürüzlülüğünde ihmal edilebilir bir değişim meydana getirdiği söylenebilir.



Şekil 6.87 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 200mm/s hız için yüzey analizi



Şekil 6.88 Farklı frekansta AA 7075 için 30W etkin güç ve 800mm/s hız için farklı frekansta yüzey analizi

Şekil 6.88a ve b'de 800mm/s'deki tarama hızı ve farklı frekans değerleri için yüzey kesit görüntüleri ve yüzey pürüzlülük grafikleri görülmektedir. Kesit görüntülerinden ve pürüzlülük grafiklerinden frekansın yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişim yaratmadığı görülmüştür. Artan frekansla birlikte yüzey pürüzlülük değeri artmış ancak değerler arasındaki fark (0.36µm) ihmal edilebilir bir değişimin (%11,69) olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, artan hızın frekanstan bağımsız olarak yüzey pürüzlülüğünde ve profilinde iyileşme sağladığı

tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük değerinde çok belirgin olmasa da azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

Şekil 6.87'de ve Şekil 6.88'de frekanstan bağımsız olarak artan hızla birlikte yüzeydeki oyuntu derinliğinin azaldığı görülmektedir. 800mm/s'deki çakışma miktarı 200mm/s'deki çakışma miktarına göre daha düşüktür. 800mm/s'deki ve 200mm/s'deki oyuklar arasındaki mesafenin genişlikleri incelendiğinde, 800mm/s'deki mesafenin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu çakışma miktarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

6.6 Minimum Yüzey Pürüzlülüğü ve Maksimum Oyma Derinliği İçin Mikroyapı ve Sertlik Analizi

Lazerle derin oyma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne ve oyma derinliğine etkilerinin incelenmesi sonucunda en küçük yüzey pürüzlülüğü ve en büyük oyma derinliği için parametrelerin seçilen değerleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de sırasıyla listelenmiştir.

Çizelge 6.1 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen değerleri

Parametre	AISI H13	AISI 316	AA 7075	Tungsten Karbür
Hız (mm/s)	800	800	800	400
Etkin Güç (W)	18	18	18	18
Frekans (kHz)	20	20	20-40	20
Tarama Aralığı (mm)	0.03	0.03	0.03	0.02-0.03
Ölçülen değer	1,75µm	2,17µm	3,86µm	1,67µm

Çizelge 6.2 Lazer derin oyma işleminde her bir malzeme için en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen değerleri

Parametre	AISI H13	AISI 316	AA 7075	Tungsten Karbür
Hız (mm/s)	200	200	200	200
Etkin Güç (W)	30	30	30	30
Frekans (kHz)	40	40	40-20	30
Tarama Aralığı (mm)	0.02	0.02	0.02	0.02
Ölçülen değer	195µm	228µm	1,02mm	51,62µm

Bu kapsamda değerlendirilen sonuçlara göre Çizelge 6.3'de listelenen mikroyapı ve sertlik deney düzeni oluşturulmuştur.

Çizelge 6.3 Mikroyapı ve sertlik deney düzeni (AISI H13, AISI 316 ve AA 7075)

No	Güç (W)	Hız (mm/s)	Frekans (kHz)	Tarama aralığı (mm)
a	18	200	20	0.03
b	18	200	40	0.03
c	18	800	20	0.03
d	18	800	40	0.03
e	30	200	20	0.03
f	30	200	40	0.03
g	30	800	20	0.03
h	30	800	40	0.03

Çizelge 6.3'de verilen deney düzenine göre AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeler için mikroyapı ve sertlik çalışmaları yapılmıştır.

Çizelge 6.4 Tungsten Karbür için mikroyapı ve sertlik deney düzeni

No	Güç (W)	Hız (mm/s)	Frekans (kHz)	Tarama aralığı (mm)
a	18	200	20	0.03
b	18	200	30	0.03
c	18	400	20	0.03
d	18	400	30	0.03
e	30	200	20	0.03
f	30	200	30	0.03
g	30	400	20	0.03
h	30	400	30	0.03

6.6.1 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi

Şekil 6.89'daki mikroyapı analiz resimleri incelendiğinde iki farklı yapı görülmektedir. Bu yapılardan biri beyaz tabakanın görüldüğü yapı diğeri de bu tabakanın hemen altında neredeyse gözlenemeyecek kadar dar olan ve ısıdan kısmen etkilenen yapıdır. Yüksek tarama hızlarında lazer ışını ile metal arasındaki etkileşim süresi azalmaktadır ve bu sebepten ısıdan etkilenen bölgenin genişliği de azalmaktadır.

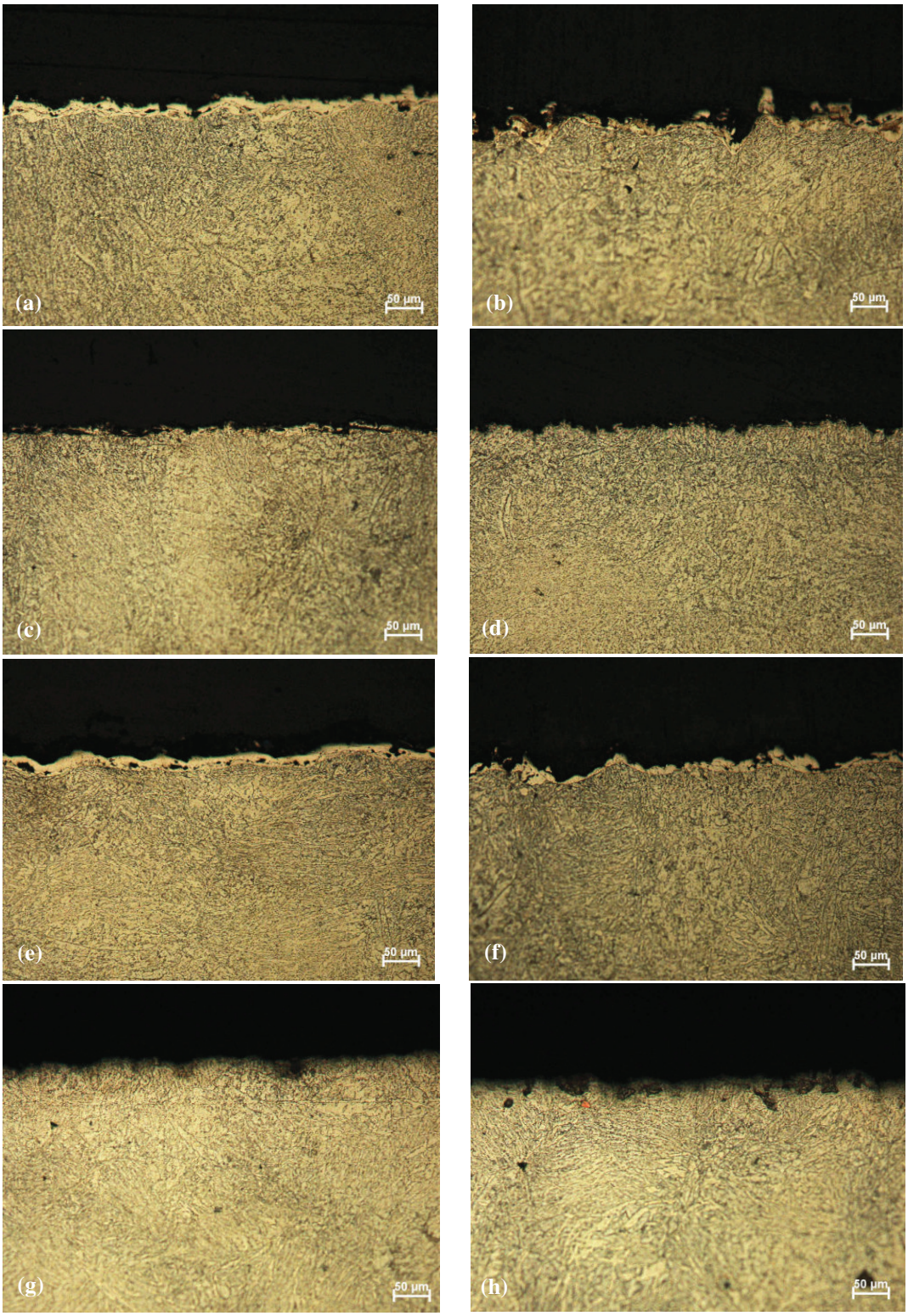
Şekil 6.89 c, d, g ve h'deki resimlerde tarama hızı en yüksek değerde yani 800mm/s'dedir. Diğer resimler tarama hızının en küçük değeri olan 200mm/s' de yapılan oyma işlemlerine aittir. Bu hızla taranmış Şekil 6.89'de a, b, e ve f' deki resimlerde farklı kalınlıkta beyaz tabakalar görülmektedir. Beyaz tabaka olarak adlandırılan bu tabakanın kalınlığı farklılık göstermektedir. Bununla birlikte rakamsal olarak frekansın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu tespit edilmiştir ve buna benzer bir durum yani frekansın beyaz tabakanın kalınlığında da belirgin bir etkisinin olamadığı net olarak fotoğraflardan görülmektedir. Ayrıca kesit resimlerde görülen yüzey profili, tarama aralığından bağımsızdır. Bu profil hızın ve frekansın etkileşimiyle oluşan atım çakışması tarafından oluşturulmuştur.

Şekil 6.89'da beyaz tabaka kalınlığının en yüksek olduğu (a) ve (e) resimleri ile (b) ve (f) resimleri 18W ve 30W etkin güçte yapılan oyma işlemi sonucunda oluşan yüzeyden çekilen görüntülere aittir. Resimlerden (a) ve (e) için güç dışında

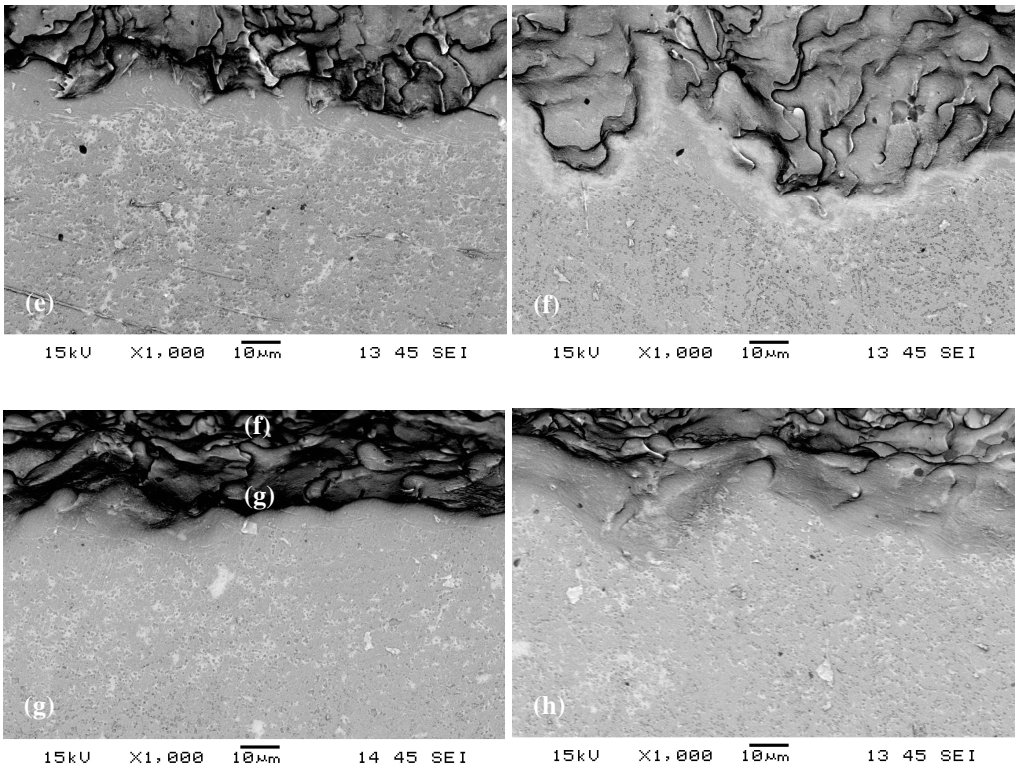
diğer tüm parametreler aynıdır ve beyaz tabaka kalınlığı (e)'deki resimde bir miktar daha fazladır ancak bu belirgin bir fark değildir. Bununla birlikte, (b) ve (f) için güç dışında diğer tüm parametreler aynıdır ve beyaz tabaka kalınlığı (f)'deki resimde daha fazladır.

Şekil 6.89'da (c), (d), (g), (h) ile gösterilen görüntülerde de beyaz tabaka olmasına rağmen görülemeyecek kadar dar bir kalınlığa sahiptirler. Beyaz renkte bir tabaka olarak görülen bu yapı gerçekte erimiş ve yeniden katılaşmış bir tabakadır. Şekil 6.89'de (e), (f), (g), (h) ile isimlendirilen optik mikroskop görüntülerindeki yapıyı açıklayabilmek için SEM incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.90'da yüksek güçte yapılan oyma işlemlerinin SEM inceleme görüntüleri görülmektedir. Bu resimlerde değişken olan parametreler hız ve frekanstır.

Şekil 6.90'da gösterilen dört görüntüde de beyaz tabakanın varlığı ve kalınlığı net bir şekilde görülebilmektedir. Ancak (e) ve (f) ile gösterilen görüntülerdeki beyaz tabakanın kalınlığı, (g) ve (h) ile gösterilen görüntülerdeki beyaz tabakanın kalınlığına göre daha fazladır. Tabaka kalınlığının (e) ve (f)'de yüksek olmasının sebebi oyma işleminin düşük hızda yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.90'da (e) ve (f) ile gösterilen görüntülerdeki beyaz tabakanın kalınlığı neredeyse aynı ve bu iki görüntünün elde edildiği oyma parametrelerinden sadece frekans değişkenlik göstermektedir. Bu şartlardaki oyma işleminde frekansın beyaz tabaka kalınlığında bir değişkenlik meydana getirmediği görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 6.90'da (e) ve (g) aynı frekans ve farklı hızlarda işlenmiş yüzeyden alınmış görüntülerdir. 200mm/s'de işlenmiş yüzeydeki (e) beyaz tabaka kalınlığının 800mm/s'de işlenmiş yüzeydeki (f) beyaz tabaka kalınlığına göre daha büyük olduğu net olarak görülebilmektedir.



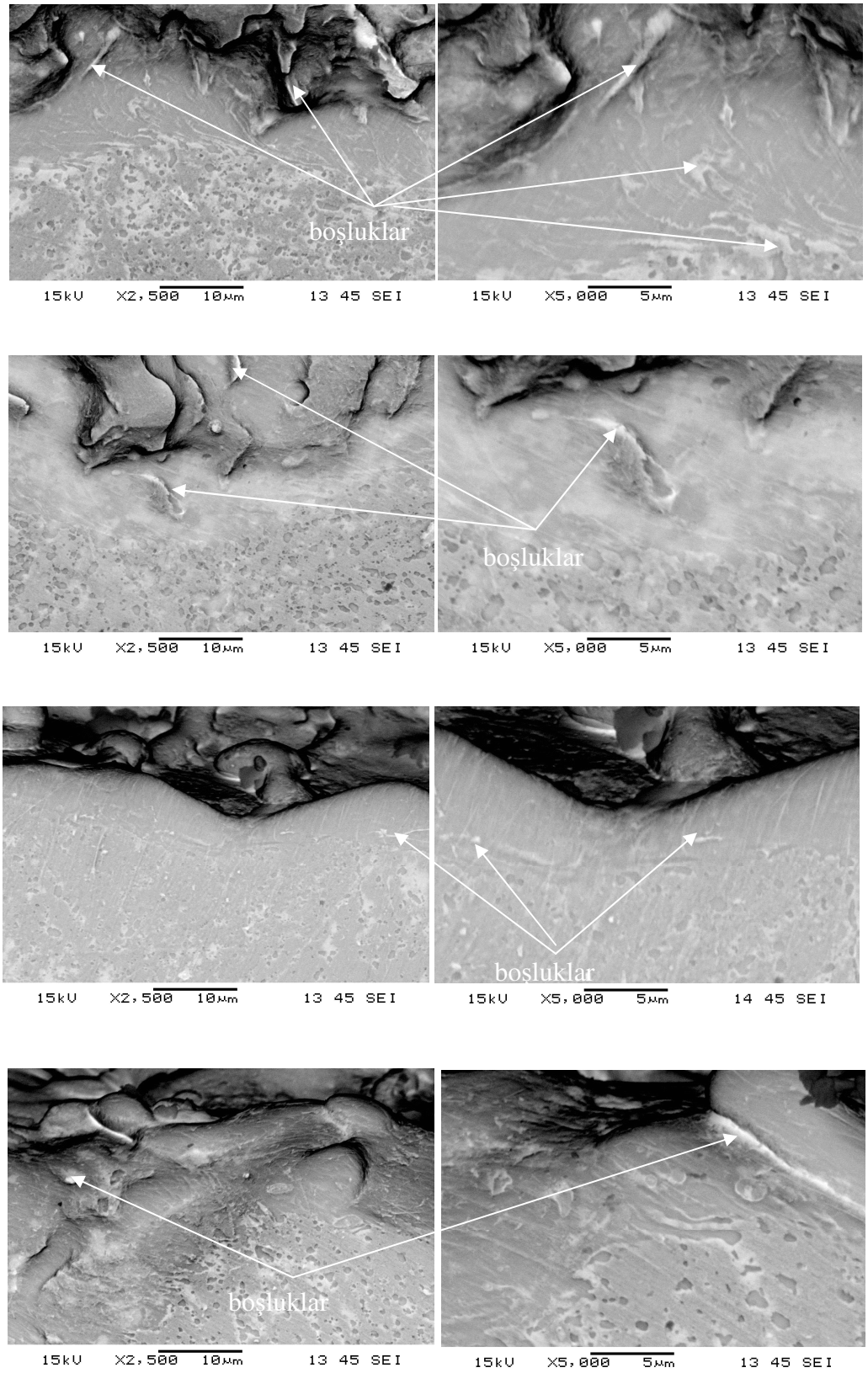
Şekil 6.89 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi



Şekil 6.90 AISI H13 takım çeliği için SEM inceleme görüntüleri;

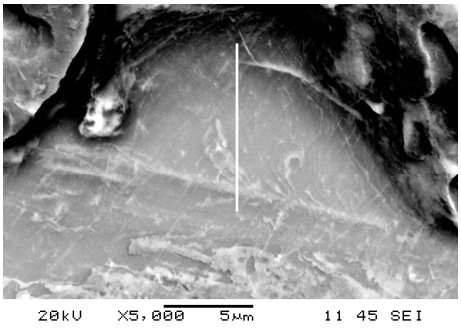
(e) G= 30W, H=200mm/s, F=20kHz
(f) G= 30W, H=200mm/s, F=40kHz
(g) G= 30W, H=800mm/s, F=20kHz
(h) G= 30W, H=800mm/s, F=40kHz

Şekil 6.91'de görülen SEM görüntülerinin hepsinde yeniden katılaşmış tabakalarda ve alt tabakayla birleşen noktalarda boşlukların olduğu görülmektedir. Boşlukların oyuktan dışarı doğru yönlendiği görülmektedir. Bu tabakaların sertlikleri, ilgili deney şartlarında farklı bölgelerden alınmış üç adet ölçümle belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki deney şartları ne olursa olsun beyaz tabakanın sertliği 320HV ile 350HV arasında değişmektedir.



Şekil 6.91 AISI H13 takım çeliği için boşluk görüntüleri

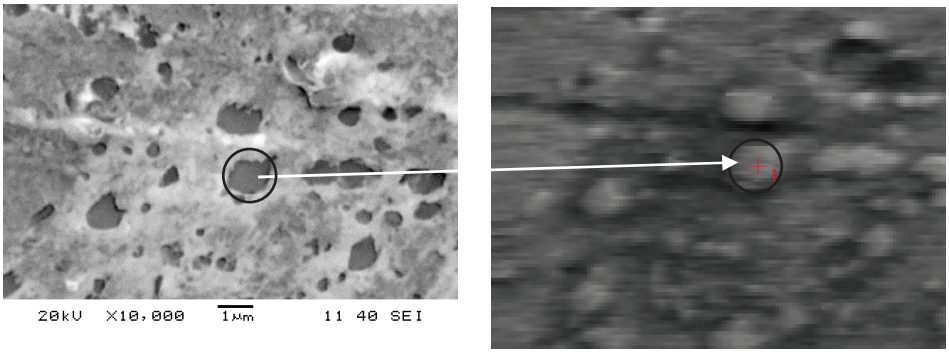
Beyaz tabakanın sertliğinin ana yapıdan yüksek çıkması sonucu bu tabakanın nasıl bir yapıya sahip olduğunu tespit edebilmek için EDS analizi ve XRD analizleri yapılmıştır. Analizlerin ilki sadece beyaz tabaka üzerinden bir çizgi boyunca yapılan analizdir ve Şekil 6.92'de analizin yapıldığı bölge görülebilmektedir. Bir çizgi boyunca yapılan analiz sonucunda element oranlarında ana malzemeye göre farklılığın olduğu tespit edilmiştir. Çizelge 6.5'de karşılaştırmalı analiz sonuçları görülmektedir. Cr ve Mn oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Buna karşın C oranında 2 kat, Si ve Mo oranında 1,5 kat ve V oranında ise 2,5 kat artış olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, beyaz bölgenin hemen altındaki bölgede yine beyaz renkte olan taneler için noktasal analiz yapılmıştır. Şekil 6.93'de analizi yapılan nokta görülmektedir. Bu analiz sonucunda Çizelge 6.6'daki sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 6.6'da hem noktanın analiz sonucu hem de ana metalin analiz sonucu görülmektedir. Analiz sonucunda C oranının ana metalin C oranına göre 20 kat daha fazla olduğu bununla birlikte Si ve V oranlarının da yükseldiği görülmüştür. Diğer elementlerden Cr ve Mo oranında azalma ve Mn oranında ise herhangi bir değişim tespit edilmemiştir.



Şekil 6.92 AISI H13'de beyaz bölge için çizgisel analizin yapıldığı bölge

Çizelge 6.5 AISI H13 için EDS analiz sonucu

Element	Çizgi analiz sonucu oranları (Wt,%)	Ana metal element oranları (Wt,%)
C	0,685	0,3
Si	1,395	1
V	0,961	0,4
Cr	4,52	5,54
Mn	0,202	0,36
Mo	2,133	1,33
Fe	90,104	kalan

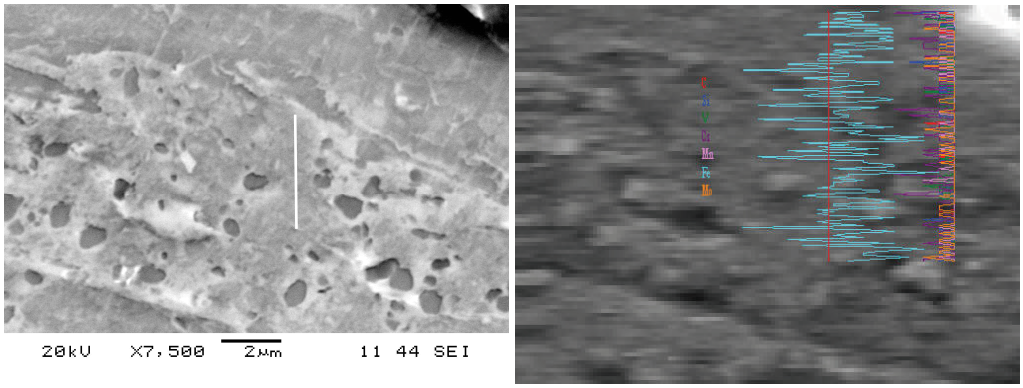


Şekil 6.93 AISI H13 için EDS ile nokta analizinin yapıldığı bölge

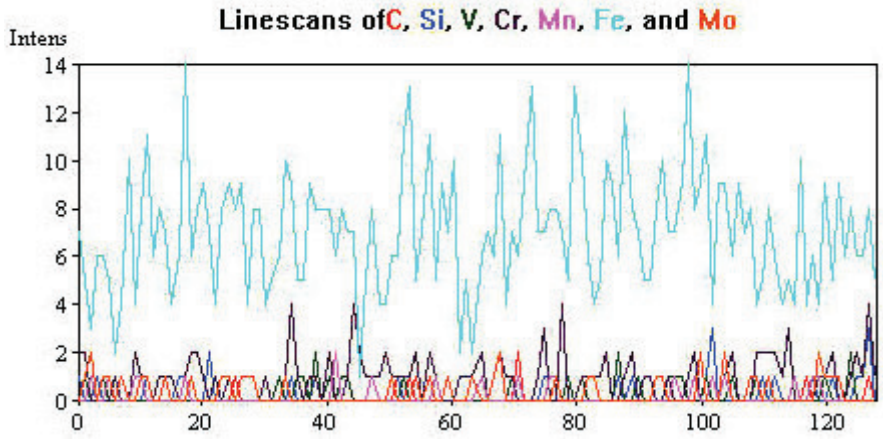
Çizelge 6.6 AISI H13 için EDS ile nokta analizinin sonucu

Element (Wt,%)	Nokta analiz sonucu oranları (Wt,%)	Ana metal element oranları (Wt,%)
C	6,834	0,3
Si	1,247	1
V	0,72	0,4
Cr	4,314	5,54
Mn	0,351	0,36
Mo	2,133	1,33
Fe	85,282	kalan

Beyaz tabakanın (yeniden katılaşmış tabaka) analizi ile noktasal analizin dışında kalan bölgede, noktalara ve beyaz bölgeye denk gelmeyen bir bölgede çizgisel analiz yapılmıştır. Şekil 6.94, çizgisel analizin yapıldığı bölgeyi göstermektedir. Şekil 6.95'de analiz sonucu görülmektedir. Bu resimdeki piklerden Mn oranın yüksek olduğu görülmektedir.

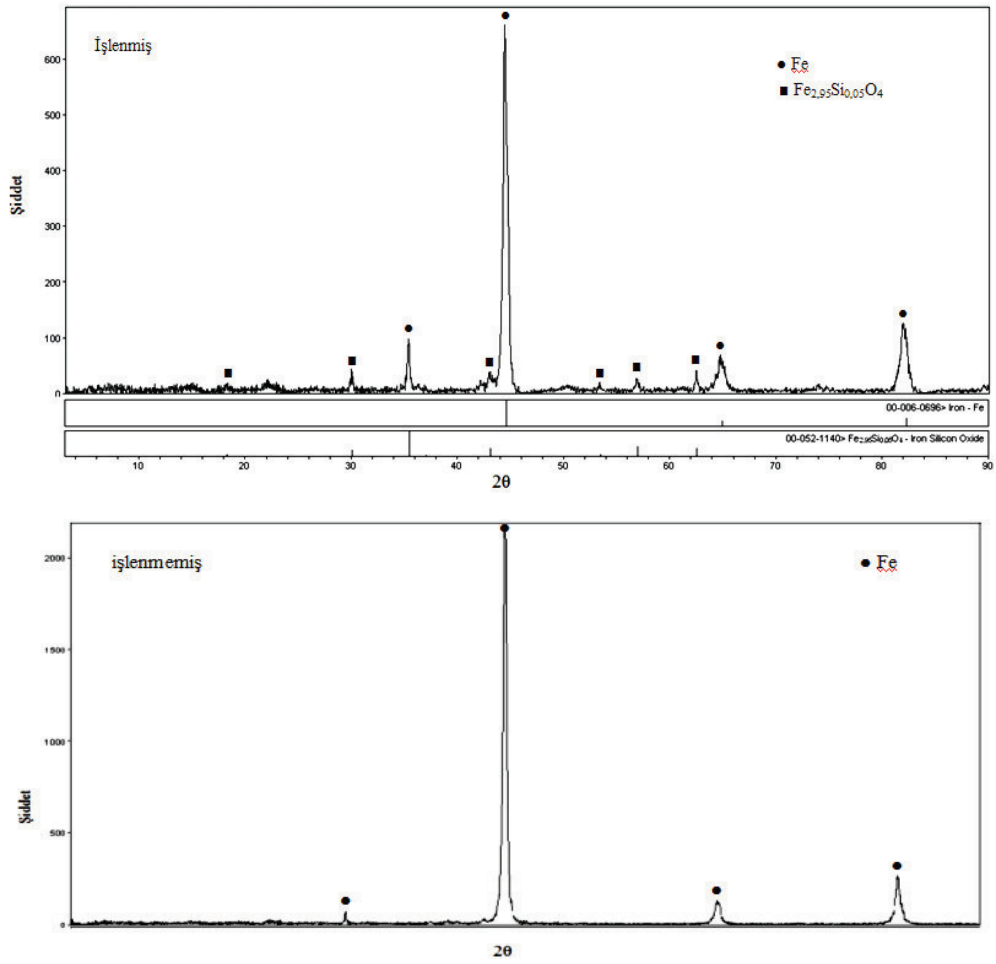


Şekil 6.94 AISI H13 takım çeliği için çizgisel analiz



Şekil 6.95 AISI H13 takım çeliği için çizgisel analiz sonucu

Yüzeyi farklı lazer oyma parametreleriyle işlenmiş metale ve lazerle işlem görmemiş metale XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 6.96'da işlemsiz metalin ve işlenmiş metallerin karşılaştırmalı sonuçları görülmektedir. Herhangi bir lazer işlemine tabi tutulmamış AISI H13 takım çeliğinin yüzeyinde yapılan analizler sonucu sadece Fe elementinin piklerine rastlanmıştır. Bununla birlikte farklı oyma parametreleri ile oyulmuş iki farklı metale yapılan analizler sonucunda her iki metalin yüzeyinde de Fe elementinin piklerinin dışında ayrıca $Fe_{2.96}Si_{0,05}O_4$ (demirsilisyumoksit) bileşiğinin piklerine de rastlanmıştır.



Şekil 6.96 AISI H13 takım çeliği için işlenmiş ve işlenmemiş metalin XRD analiz sonuçları

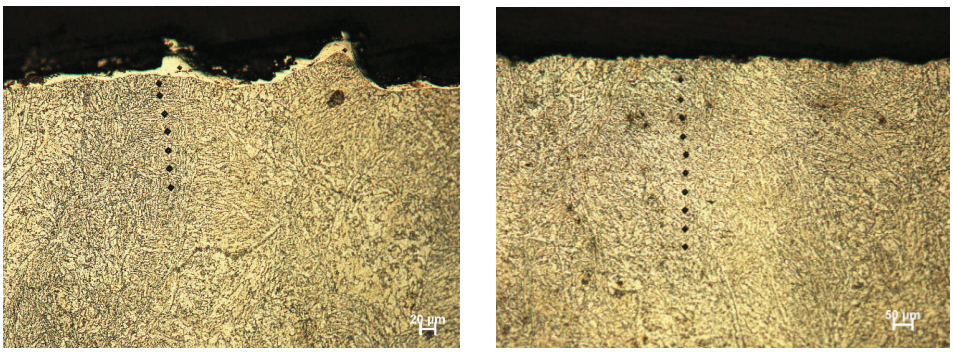
6.6.2 AISI H13 takım çeliği için parametrelerin seçilen değerlerinin sertlikteki değişimlere etkisi

Lazerle oyulmuş yüzeyin hemen alt tabakasından işlenmiş yüzeye dik kesitte Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Beyaz tabaka ve beyaz tabakanın dışında kalan yapı için 25µm aralıklarla 10sn. süreyle ve 10gr. yükle sertlik ölçümü yapılmıştır ve mesafeye bağlı sertlik dağılımı analizi yapılmıştır. Şekil

6.97'de ölçüm aralıkları ve Şekil 6.98 - 101'de ölçüm sonuçları görülmektedir. Sertlik ölçümlerine ait sonuçlar Çizelge 6.7'de listelenmiştir.

Çizelge 6.7 AISI H13 takım çeliği için sertlik ölçüm sonuçları

No	Parametreler			Mesafe (µm) / Vickers sertlik (HV)									
	G (W)	H (mm/s)	F (kHz)	*Beyaz Tabaka*			*25 µm*	*50 µm*	*75 µm*	*100 µm*	*125 µm*	*150 µm*	*175 µm*	*200 µm*
a	18	200	20	321	323	321	171	168	172	167	167	168	168	167
b	18	200	40	260	258	-	194	196	182	188	190	184	187	185
c	18	800	20	Beyaz bölge dar			185	185	187	186	178	176	177	176
d	18	800	40	Beyaz bölge dar			172	170	175	173	164	176	171	170
e	30	200	20	323	356	337	176	175	174	171	170	171	170	173
f	30	200	40	417	359	350	179	179	174	170	169	171	169	170
g	30	800	20	Beyaz bölge dar			193	196	198	197	196	194	190	193
h	30	800	40	Beyaz bölge dar			199	200	201	200	201	193	194	195

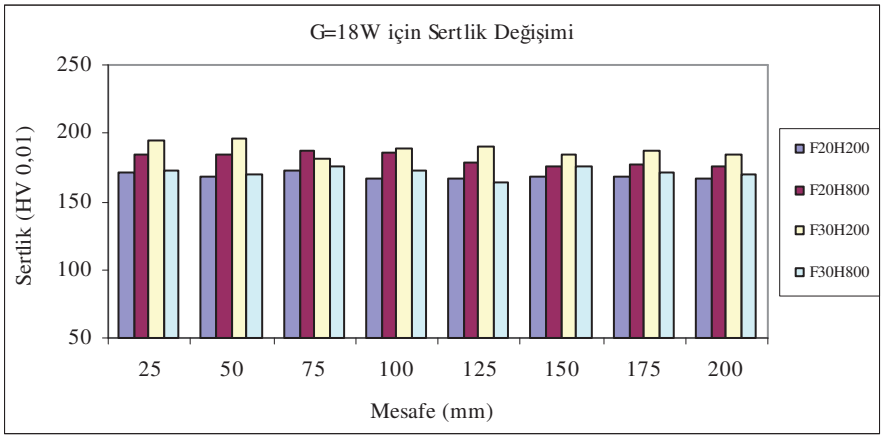


Şekil 6.97 AISI H13 takım çeliği için sertlik ölçüm görüntüsü

Ölçümlerin sonucunda beyaz tabakanın sertlik değerinin bu tabakanın dışında kalan bölgenin sertlik değerinden daha yüksek olduğu ve yaklaşık olarak % 70 ve % 80 arasında değişen bir fazlalık tespit edilmiştir. Çizelge 6.7'de görüldüğü gibi beyaz tabakanın sertliği yüksek güçte en fazla 417HV iken, düşük güçte 323HV olarak ölçülmüştür. Düşük güçte yapılan oyma işlemlerinde beyaz tabakanın kalınlığının düşük olması ve iz genişliğinin (10µm) tabaka kalınlığına yakın bir ölçüde olması, tabaka içinde izin ortalanıp ölçüm alınmasında sıkıntılar yaratmıştır.

Şekil 6.98'de gücün 18W etkin güçte olduğu değişken frekans ve tarama hızı için sertlikteki değişim görülmektedir. 20kHz'de artan hız sertlikte artış meydana getirmiştir. 40kHz'de ise tam tersi durum ortaya çıkarmıştır yani artan hız sertlikte artış meydana getirmiştir. Ancak, hem sertlik sonuçları hem de grafik incelendiğinde frekans sertlik üzerinde etkisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 200mm/s'de artan frekans sertlikte artış

meydana getirmiştir. 800mm/s'de artan frekans sertlikte azalma meydana getirmiştir. Çizelge 6.7'deki sonuçlara bakıldığında 18W etkin güçte dört farklı deney kombinasyonunda sadece 200mm/s ve 40kHz'deki oyma işlemi sonucunda sertlikte belirgin bir değişim tespit edilirken diğer koşullardaki değişimler ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Sertlikteki bu fark, bu parametrelerin kullanıldığı koşullarda çakışma oranın diğer deney koşullarına göre yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek çakışma miktarı birim alandaki ısı miktarını arttırmaktadır ki bu durum daha derin bir bölgenin ısıdan etkilenmesine sebep olmaktadır. Bu bölgenin sertliğinin ısınma ve hızlı soğuma etkisiyle arttığı düşünülmektedir.



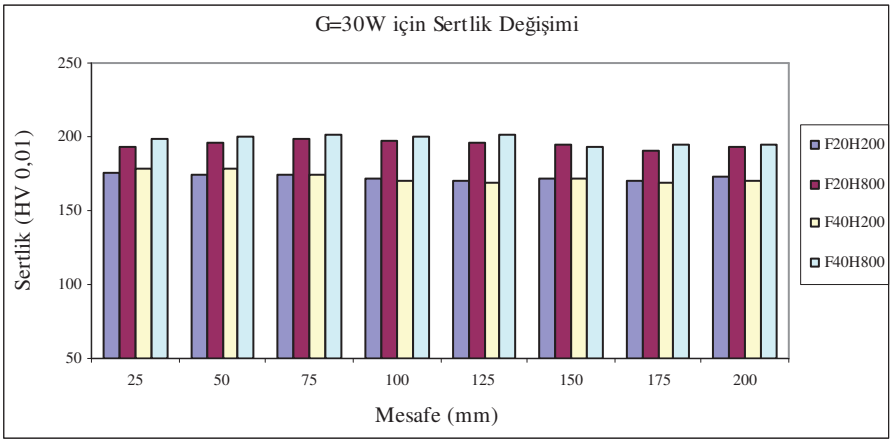
Şekil 6.98 AISI H13 takım çeliği için 18W etkin güçte sertlik değişimi

Şekil 6.99'da etkin gücün 30W olduğu değişken frekans ve tarama hızı için sertlikteki değişim görülmektedir. 20kHz ve 40kHz için artan hız sertlikte artış meydana getirmiştir. 800mm/s ve 200mm/s'deki hız değerleri için yapılan oyma işlemlerinde frekans sertlikte nerdeyse bir değişim yaratmamıştır.

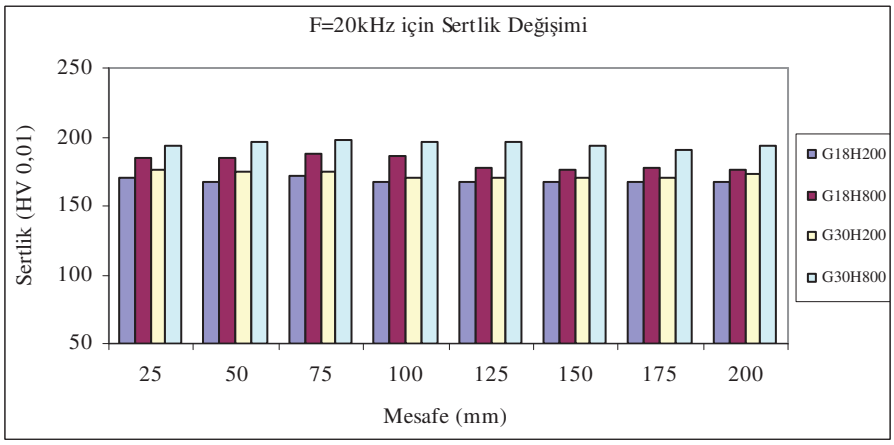
Şekil 6.100'de 20kHz'de değişken hız ve güç için sertlik değişimleri görülmektedir. 20kHz ve 200mm/s için artan güç sertlikte neredeyse bir değişim yaratmazken 800mm/s için artan güç sertlikte artış meydana getirmiştir. Çizelge 6.7'de serlik değişimleri incelendiğinde en çok 26HV'lik bir fark tespit edilmiştir. Şekil 6.101'de 40kHz'de değişken hız ve güç için sertlik değişimleri görülmektedir. 200 mm/s için artan güç sertlikte azalma meydana getirmiştir. 800 mm/s için artan güç sertlikte artış meydana getirmiştir.

Grafiklerde serlikte değişmeler net olarak görülebilmektedir. Bununla birlikte Çizelge 6.7'deki sertlik değişimleri rakamsal olarak incelendiğinde beyaz bölge hariç sertlikte belirgin bir değişim tespit edilememiştir. Burada da hızın

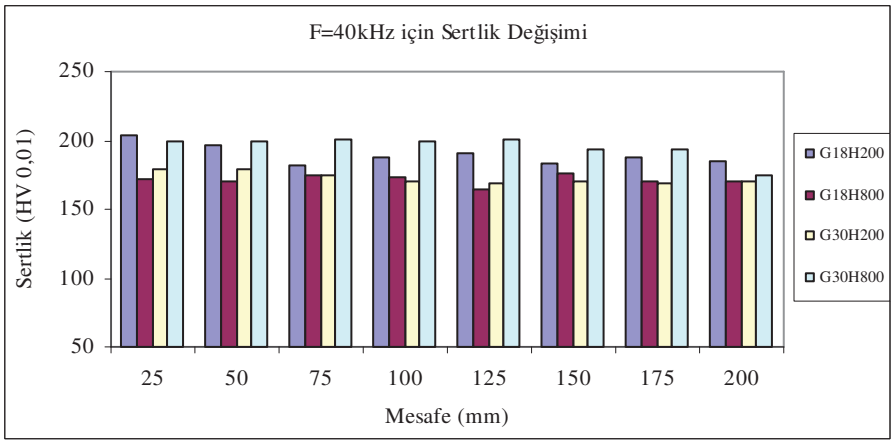
sertlik dağılımında etkisinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu görülebilmektedir. Genel bir değerlendirmeyle hız sadece etkileşim süresini ve dolayısıyla beyaz tabakanın kalınlığında etkili olmuştur.



Şekil 6.99 AISI H13 takım çeliği için 30W etkin güçte sertlik değişimi



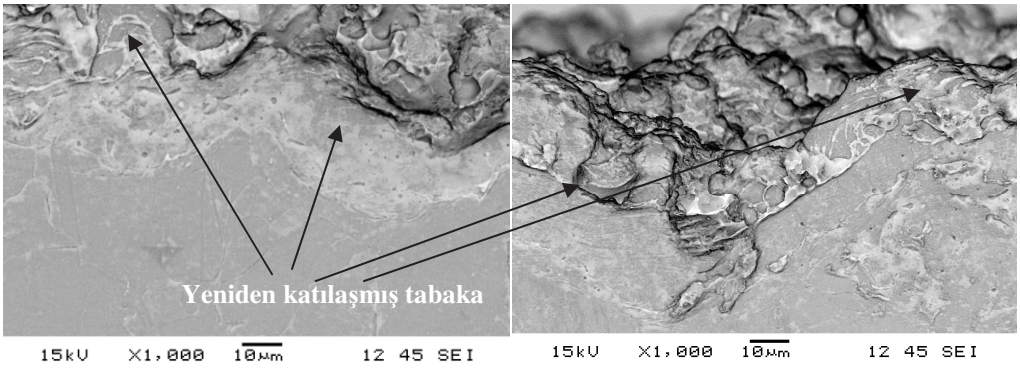
Şekil 6.100 AISI H13 takım çeliği için 20kHz'deki frekansta sertlik değişimi



Şekil 6.101 AISI H13 takım çeliği için 40kHz'deki frekansta sertlik değişimi

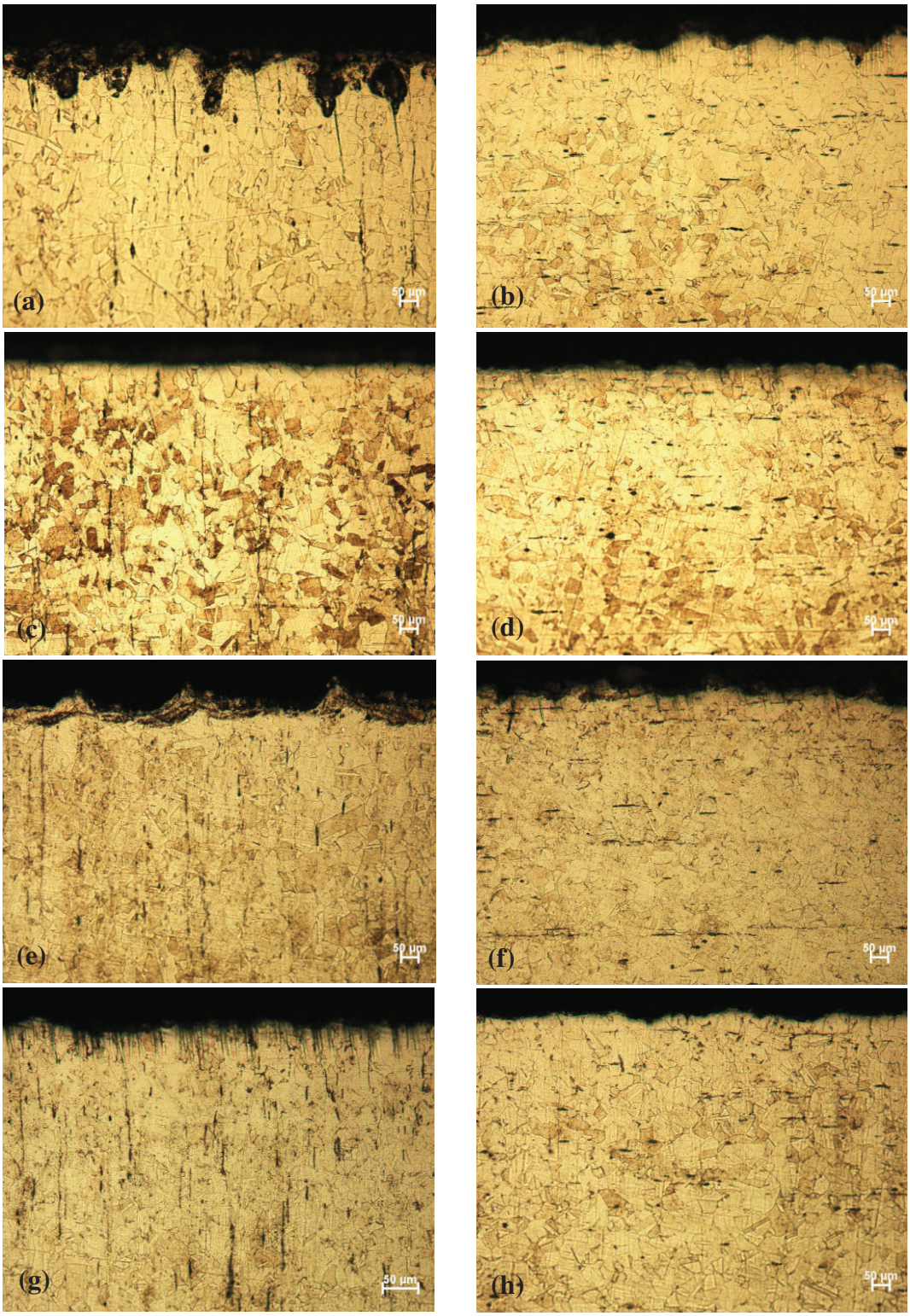
6.6.3 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi

Şekil 6.102, AISI 316 paslanmaz çelik için Çizelge 6.3'de listelenen deneysel koşullar için yapılan mikroyapı analiz sonuçlarını göstermektedir. Lazer oyma işlemi sırasında ergime ve buharlaşma işlemi sonunda hızlı soğuma sebebiyle tekrar katılaşan artık metal, yüzeyde yeniden katılaşmış tabaka olarak kalır. Şekil 6.102'de a, b, f ve e'de gösterilen optik mikroskop görüntülerinde çok belirgin bir şekilde yeniden katılaşmış tabaka görülebilmektedir. Yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı lazer ışını ile metal arasındaki etkileşim süresinden etkilenmektedir. Artan hızla ve etkileşim süresiyle birlikte yeniden katılaşan tabaka kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 6.102'de farklı kalınlıklarda yeniden katılaşmış tabaklar belirgin bir şekilde görülebilirken bazıları görülememektedir. Görülemeyen yapıları detaylı gösterebilmek amacıyla ve Çizelge 6.3'deki e, f, g ve h ile gösterilen deney koşulları için SEM incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.103'de oyulmuş yüzey ve yeniden katılaşan tabakaya ait SEM inceleme görüntüleri görülebilmektedir.

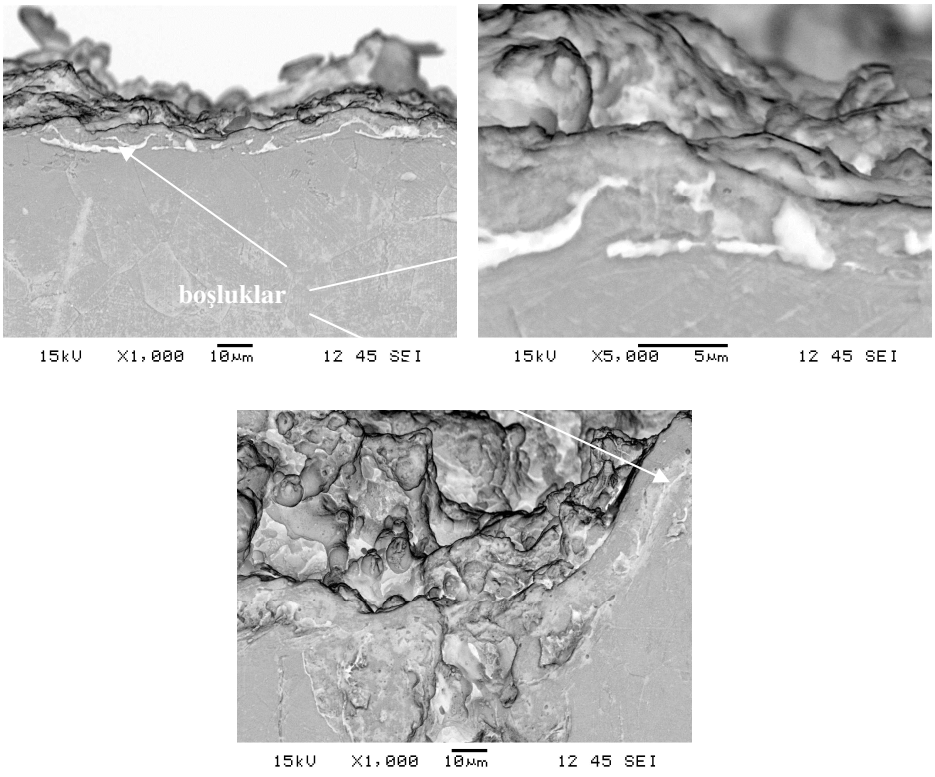


Şekil 6.103 AISI 316 paslanmaz çeliği için oyulmuş yüzeyde yeniden katılaşmış tabaka

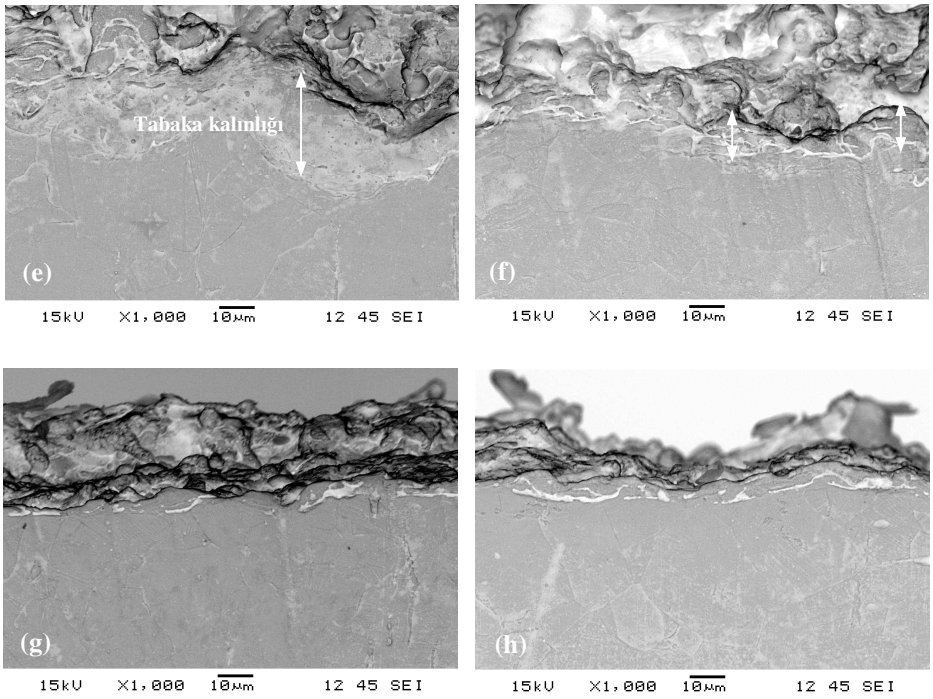
Şekil 6.104'de oyulmuş yüzeyde yeniden katılaşmış tabakanın ana metalle birleşmemesiyle ilgili örnek görüntüler bulunmaktadır. Görüntüler incelendiğinde, oyuk içinde buharlaşma sonrası ergimiş halde bulunan metal, hızlı soğuma sonrasında katılaşırken oyuk yan duvarlarına doğru bir yönelimle yeniden katılaştığı ve ana metalle tam bir birleşme meydana gelmeden katılaşma olayını tamamladığı görülmektedir.



Şekil 6.102 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi

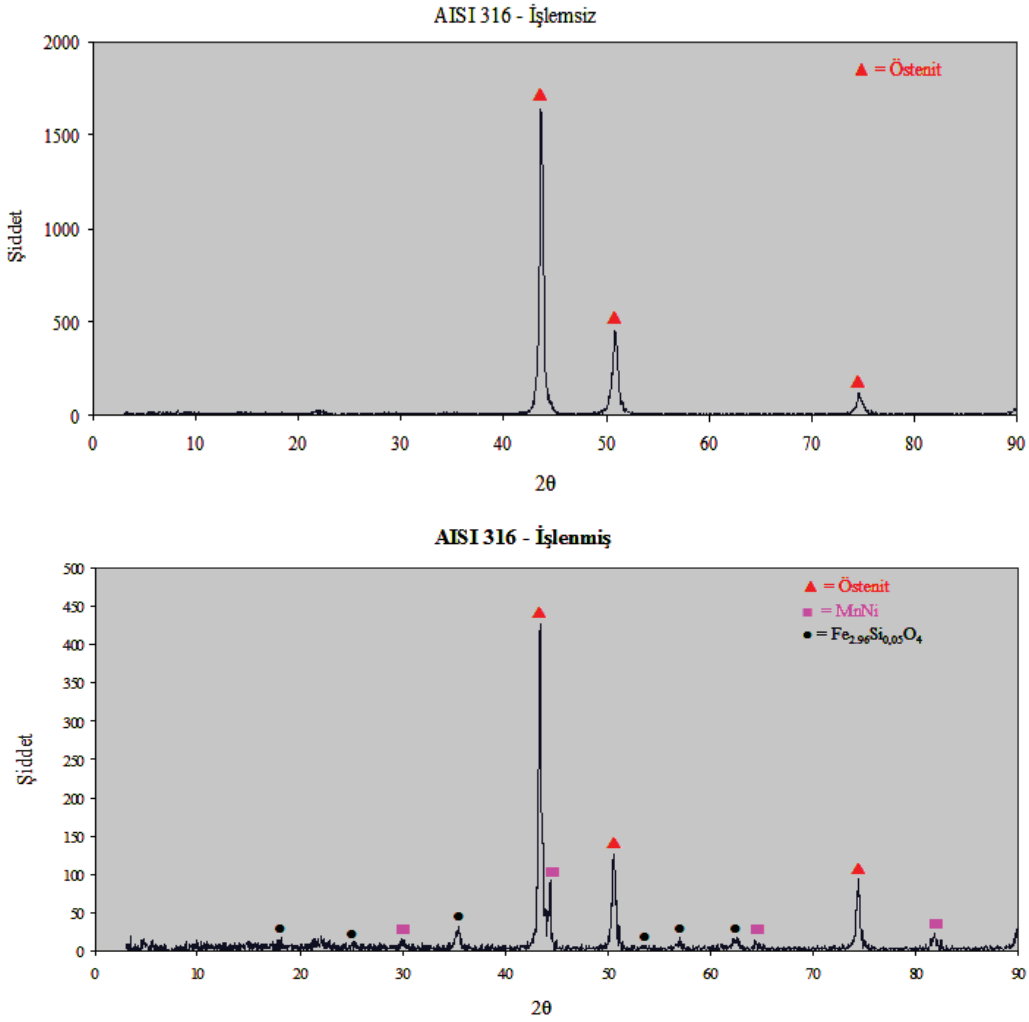


Şekil 6.104 Oyulmuş yüzeyde yeniden katılaşmış tabakanın ana metalle birleşmeme durumu



Şekil 6.105 AISI 316 paslanmaz çelik için tabaka kalınlığındaki değişim görüntüleri

Şekil 6.105e ve f' deki yeniden katılaşmış tabaka kalınlığının g ve h' ye göre daha büyük olduğu görülmektedir. Şekil 6.105e ve f, tarama hızının 200mm/s ve Şekil 6.105g ve h ise tarama hızının 800mm/s olduğu oyma koşullarında elde edilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi tarama hızı tabaka kalınlığında en etkili parametredir. Kesitten incelenen yüzeyde görülen yüzey profili atım çakışma durumunda elde edilmiş bir profildir. Şekil 6.105e ve f' deki yeniden katılaşmış tabaka kalınlığının g ve h'deki yeniden katılaşmış tabaka kalınlığına göre yüksek olmasının sebebi çakışma oranlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.



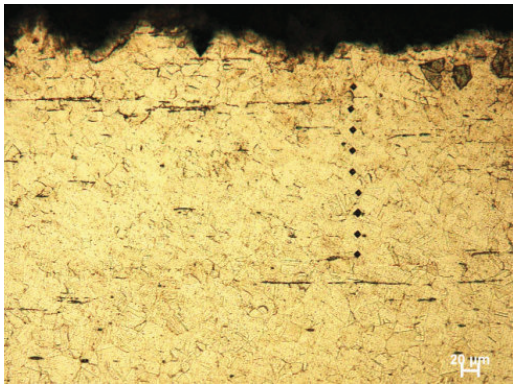
Şekil 6.106 AISI 316 paslanmaz çelik için XRD sonuçları

Yüzeyi lazerle işlenmiş ve işlenmemiş AISI 316 paslanmaz çeliğin yüzeyindeki mevcut yapıları belirlemek için XRD analizleri yapılmış ve analiz sonuçları, Şekil 6.106'da grafik olarak gösterilmiştir. Lazerle işlenmemiş metal yüzeyine yapılan analiz sonucunda ortaya çıkan piklerin hepsi östenite aittir ve yüzeyde östenitik yapı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, lazerle oyulmuş yüzeye

yapılan analiz sonucunda ortaya çıkan pikler Östenit, MnNi ve $Fe_{2.96}Si_{0,05}O_4$'e aittir. Lazerle işlem sonrasında yüzeyde işlenmemiş metale göre farklı olarak MnNi ve $Fe_{2.96}Si_{0,05}O_4$'e rastlanmıştır. Bu yeni yapılardan $Fe_{2.96}Si_{0,05}O_4$'ün oluşması durumu lazerle oyma işleminin koruyucu bir atmosferik ortamda yapılmamış olmasıyla açıklanabilir.

6.6.4 AISI 316 paslanmaz çelik için parametrelerin seçilen değerlerinin sertlikteki değişimlere etkisi

Lazerle oyulmuş yüzeyin hemen alt tabakasından işlenmiş yüzeye dik kesitte Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yeniden katılaşmış tabaka ve bu tabakanın dışında kalan yapı için 25µm aralıklarla 10gr. yükle sertlik ölçümü yapılmıştır ve mesafeye bağlı sertlik dağılımı analizi yapılmıştır. Şekil 6.107'de ölçüm yöntemi ve Şekil 6.108 ve Şekil 6.111'de ölçüm sonuçları görülmektedir. Çizelge 6.8'de parametrelere ve mesafeye bağlı sertlik sonuçları görülmektedir.



Şekil 6.107 AISI 316 paslanmaz çelik için yapılan sertlik ölçüm örneği görüntüsü

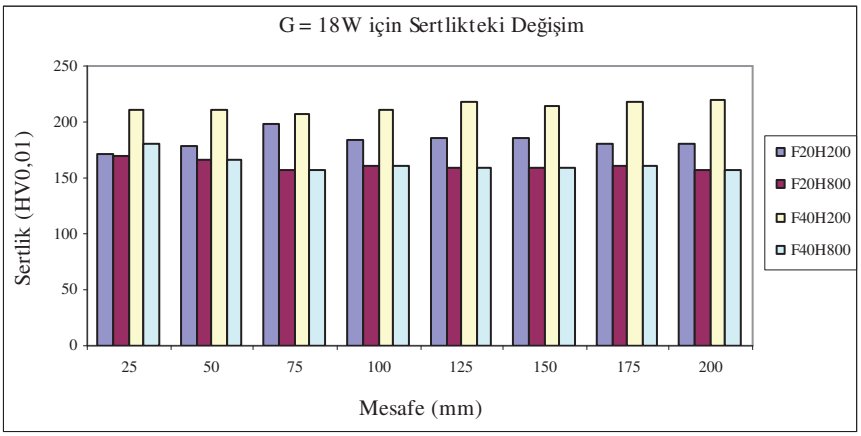
Çizelge 6.8 AISI 316 paslanmaz çelik için sertlik ölçüm sonuçları

No	Parametreler			Mesafe (µm) / Vickers sertlik (HV)							
	G(W)	H mm/s	F kHz	*25* (µm)	*50* (µm)	*75* (µm)	*100* (µm)	*125* (µm)	*150* (µm)	*175* (µm)	*200* (µm)
1	18	200	20	170	178	198	184	186	186	181	180
2	18	200	40	209	210	208	210	218	214	218	219
3	18	800	20	169	169	169	166	170	164	166	157
4	18	800	40	174	166	158	161	159	159	160	158
5	30	200	20	168	175	171	172	182	174	175	170
6	30	200	40	203	203	202	199	199	200	198	201
7	30	800	20	137	136	138	136	139	136	134	131
8	30	800	40	174	165	164	166	158	161	165	162

Şekil 6.102'deki fotoğrafların hepsinde yeniden katılaşmış tabaka bulunmaktadır. Ancak bazı tabakaların genişliği az olduğu için tabaka içinde iz

oluşturulamamıştır. Şekil 6.102a, b, e ve f'de iz oluşturulabilen tabakalar için sertlik ölçümleri yapılmıştır. Bu tabakalarda yapılan sertlik ölçümlerinde sertlik değerleri 169 Hv ile 205 Hv arasında değişmektedir. Sertlikteki bu farklılığın tabakanın genişliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Tabaka genişliği dar olan bölgelerde iz ana metale yakın olduğundan ve izin ana metale doğru meydana getirdiği plastik deformasyon sonucu bu tabakalarda yapılan ölçümlerde sertlik değeri daha düşük çıkmıştır.

Şekil 6.108'de ve Şekil 6.109'da 18W ve 30W etkin güçlerde değişken hızlarda ve frekanslarda oyulmuş yüzeylerdeki yeniden katılaşmış tabakalardaki sertlik değişimleri görülmektedir. Hem Çizelge 6.8'deki sertlik sonuçları hem de bu sonuçlara göre çizilen grafiksel gösterim sonucunda, frekansın 20kHz ve 40kHz'deki değerleri için artan hızın sertlik değerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

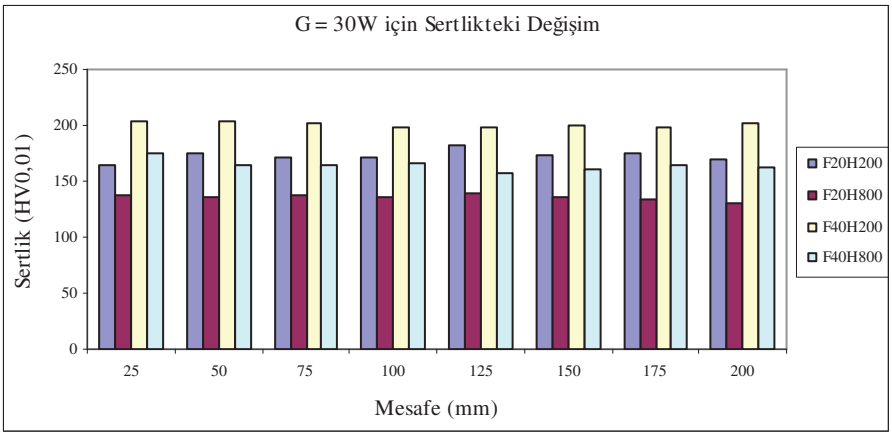


Şekil 6.108 AISI 316 paslanmaz çelik için 18W etkin güçte sertlik değişimi

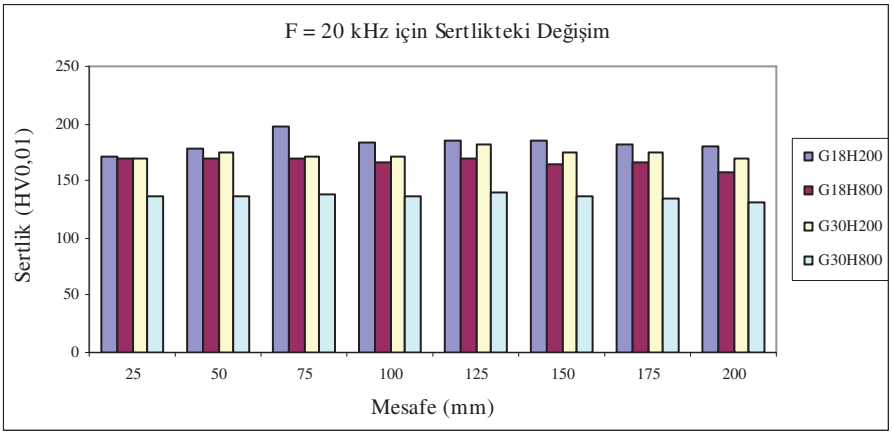
Etkin gücün 18W ve 30W olduğu değerler için en yüksek sertlik değeri 200mm/s'deki hız ve 30kHz'deki frekans değerindeki deney koşulunda elde edilmiştir. Bu deney koşulunda atım çakışma miktarı en yüksek değerindedir. Atım çakışma miktarının yüksek olması birim alandaki ısı yoğunluğunu arttırdığı için buharlaşma sonrası ergimiş metalin soğuması için geçen süre soğuma süresinin uzamasına sebep olmuştur.

Şekil 6.110'da 20kHz'deki frekans değeri için sertlik değişimi görülmektedir. 200mm/s'deki hız için artan güçle birlikte serlikte çok küçük de olsa bir azalma tespit edilmiştir. Bunun yanında 800mm/s'deki hız için de artan güç sertlikte azalma meydana getirmiştir. Artan gücün sertliği artırması her iki hız durumu için benzer bir eğilim göstermiş olsa bile 800mm/s'deki hızda daha belirgindir.

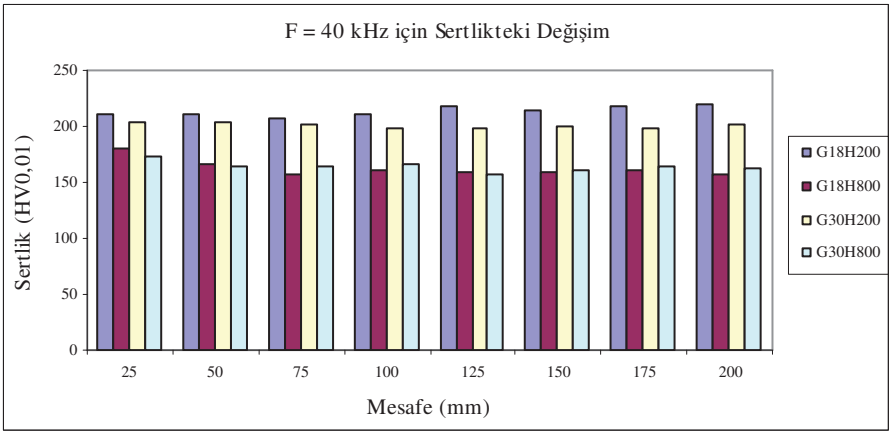
Şekil 6.111'de 40kHz'deki frekans değeri için sertlik değişimi görülmektedir. 200mm/s'deki hız için artan güçle birlikte serlikte çok küçük de olsa bir azalma tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 800mm/s'deki hız için güç sertlikte nerdeyse bir değişim yaratmamaktadır.



Şekil 6.109 AISI 316 paslanmaz çelik için 30W etkin güçte sertlik değişimi



Şekil 6.110 AISI 316 paslanmaz çelik için 20kHz'de frekans için sertlik değişimi



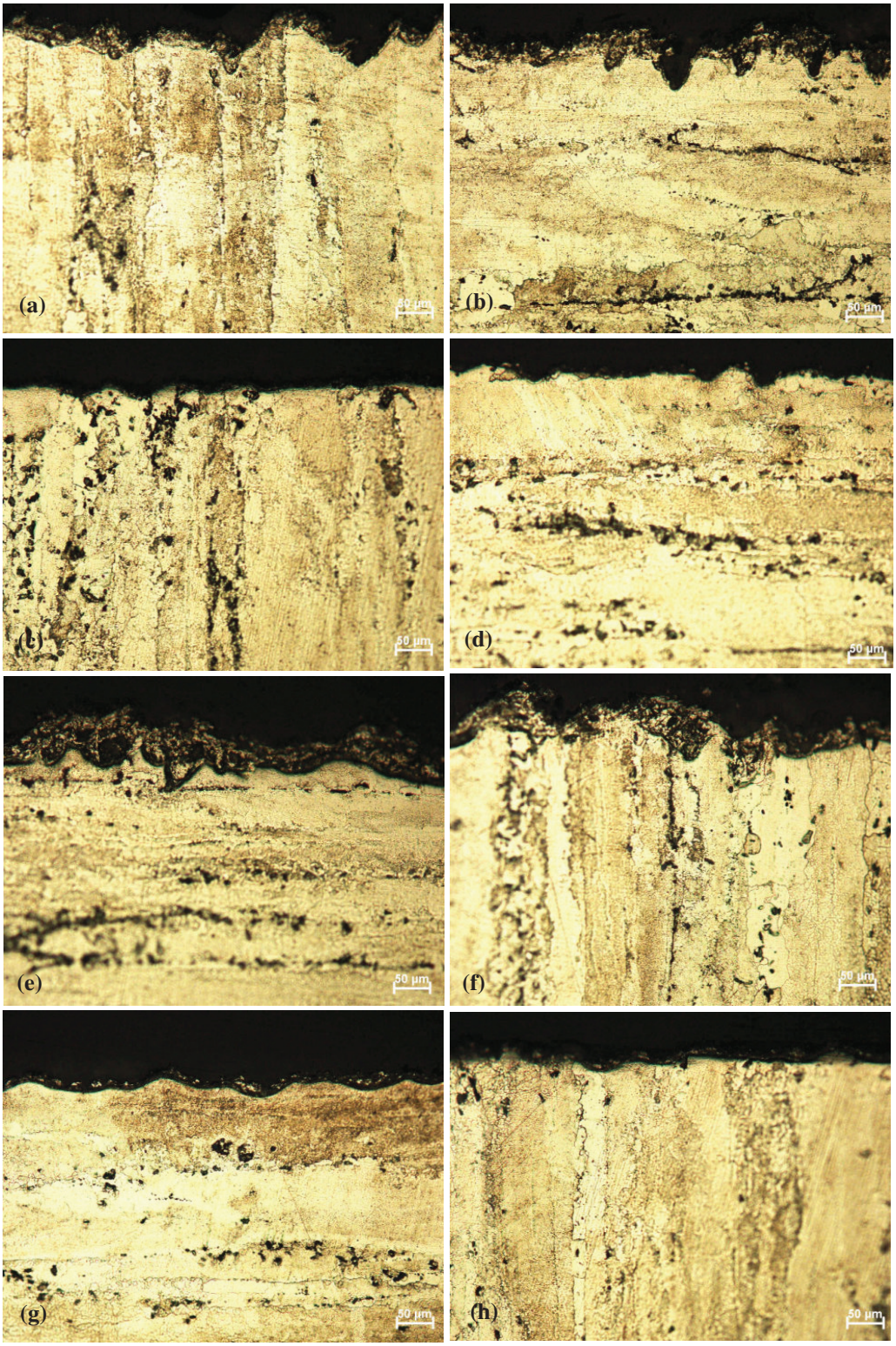
Şekil 6.111 AISI 316 paslanmaz çelik için 40kHz'de frekans için sertlik değişimi

6.6.5 AA 7075 alüminyum alaşımı için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi

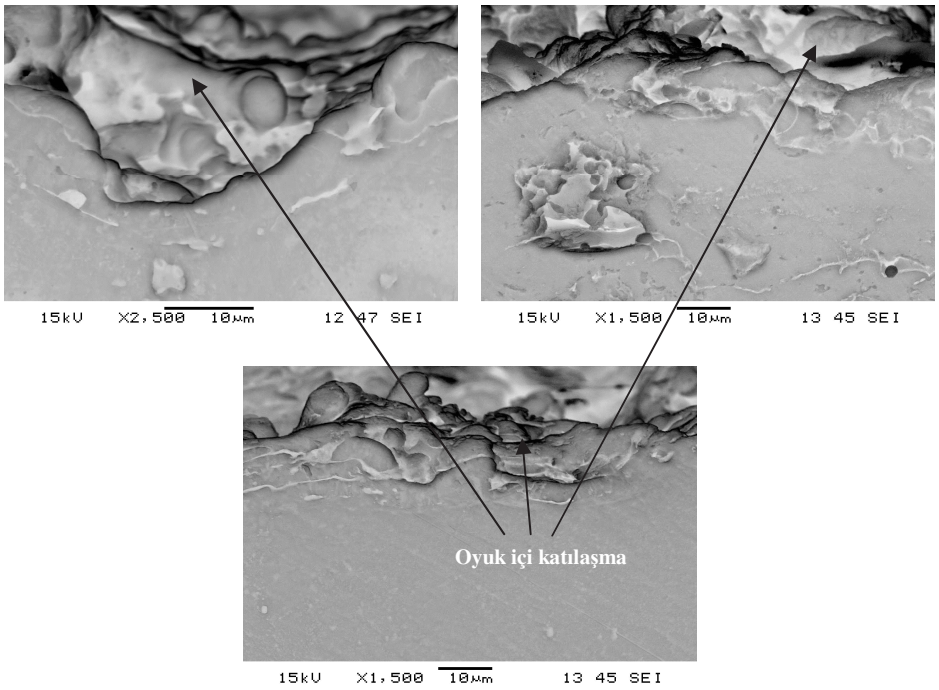
Şekil 6.112, AA 7075 alüminyum alaşımı için Çizelge 6.3'de listelenen deneysel koşullar için yapılan mikroyapı analiz sonuçlarını göstermektedir. Deney koşullarının tüm kombinasyonları için yeniden katılaşan tabaka tespit edilmiştir. Katılaşan tabakanın kalınlığı parametrelere göre değişkenlik göstermektedir. Şekil 6.112e ve Şekil 6.112f'deki yeniden katılaşan tabakanın kalınlığı diğerlerine göre belirgin bir fazlalığa sahiptir.

Şekil 6.112e ve Şekil 6.112f'deki oyma işlemleri 30W etkin güçte ve 200mm/s'deki hızda gerçekleştirilmiştir. Gücün yüksek olması ve 200mm/s'lik hızda ise lazer – metal etkileşim süresinin yüksek olması ısı girdisinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Şekil 6.112c ve Şekil 6.112d hariç diğer tüm resimlerde oyuk içindeki katılaşma çok net olarak görülebilmektedir. Oyuk içi yeniden katılaşma Şekil 6.113'deki SEM fotoğraflarında detaylı olarak görülebilmektedir.

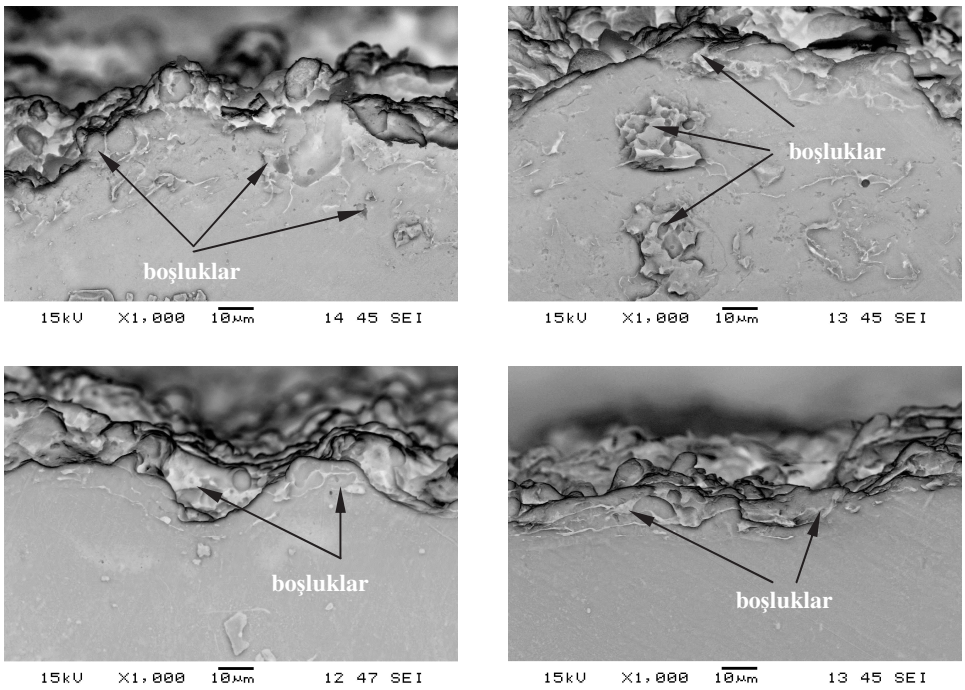
Mikroyapı analizlerinde görülen yeniden katılaşmış tabakalar için SEM incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.114'de SEM incelemelerine ait görüntüler verilmiştir. Şekil 6.114e ve Şekil 6.114f'de yüzeyde ergime ve katılaşma belirgin olarak görülebilmektedir. Resimlerin hepsinde katılaşan tabakalarda çok belirgin mikro boşluklar bulunmaktadır. Boşlukların, oyuk yüzeyine paralel ve dik bir şekilde yönlendiği görülmektedir.



Şekil 6.112 AA 7075 alüminyum alaşımı için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi



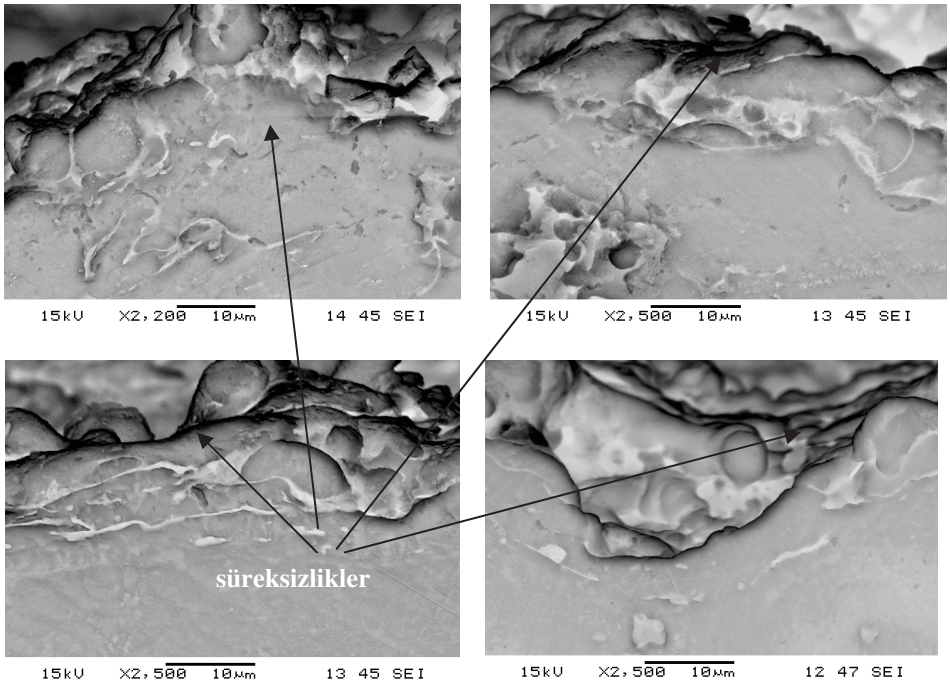
Şekil 6.113 AA7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabaka görüntüleri



Şekil 6.114 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabakadaki boşluklar ve yönelimleri

Yeniden katılaşan tabakalarda süreksizliklerde görülmektedir. Burada süreksizliklerden kasıt, ergimiş ancak sonradan katılaşmış tabakada tek seferde

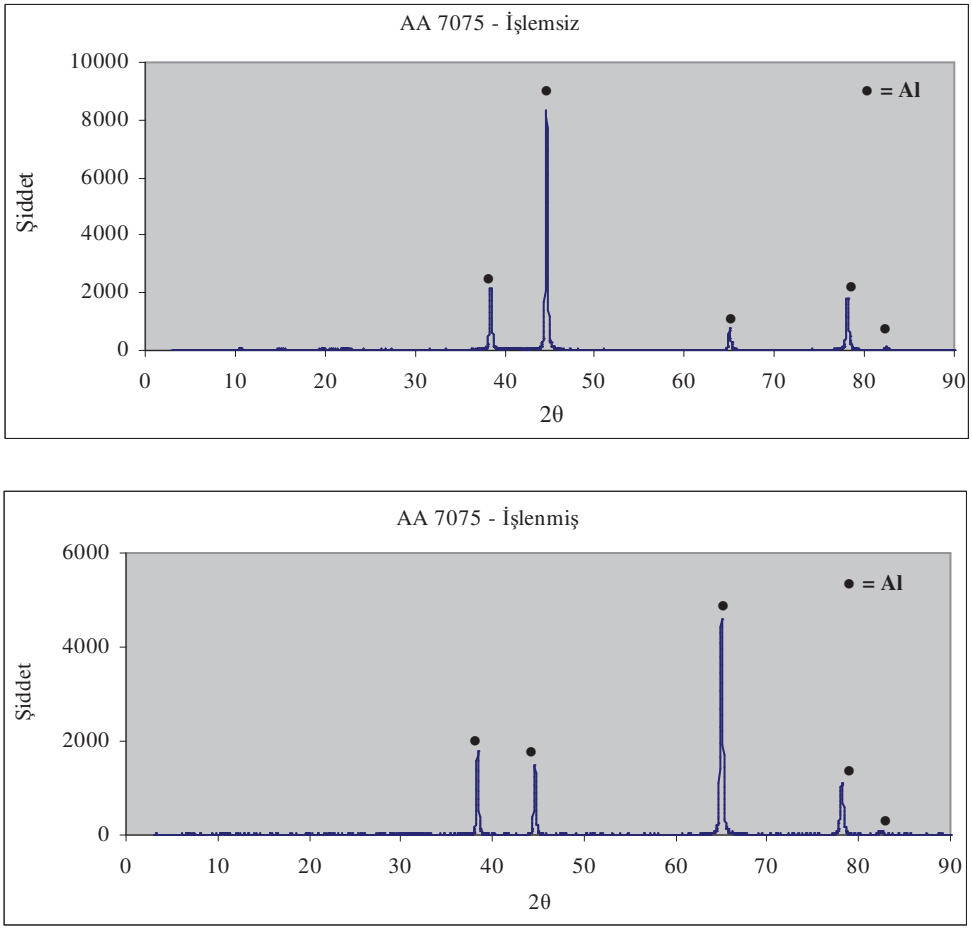
katılaşma yerine ayrı ayrı tabakaların üst üste katılaşmış olma durumundan bahsedilmektedir. Yani ergimiş metal kütlesinin hepsi aynı zamanda katılaşmamış gibi görünmektedir. Şekil 6.115'deki görüntülerin hepsinde süreksizlikler ve üst üste katılaşma çok belirgin bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 6.115 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyuk içi yeniden katılaşmış tabakadaki süreksizlikler

SEM ile kesit yüzeyde yapılan incelemeler sonucunda görülen yeniden katılaşmış tabakanın hangi fazlardan oluştuğunu tespit etmeye yönelik olarak XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizleri hem lazerle yüzeyi işlenmiş metal yüzeyine hem de işlenmemiş metal yüzeyine uygulanmıştır. Analiz sonuçları Şekil 6.116'da görülmektedir.

Lazerle yüzeyi işlenmemiş metale uygulanan XRD analizi sonucunda oluşan piklerin hepsi alüminyum (Al) pikleridir. Yüzeyi lazerle işlenmiş metalin analizi sonrasında elde edilen piklerin alüminyum'a ait pikler olduğu tespit edilmiştir. Her iki analiz sonucunda sadece piklerin şiddetleri arasında farklılık tespit edilmiştir. İşlenmiş yüzeyde herhangi bir oksit tabakasına ait bir pik tespit edilmemiştir.

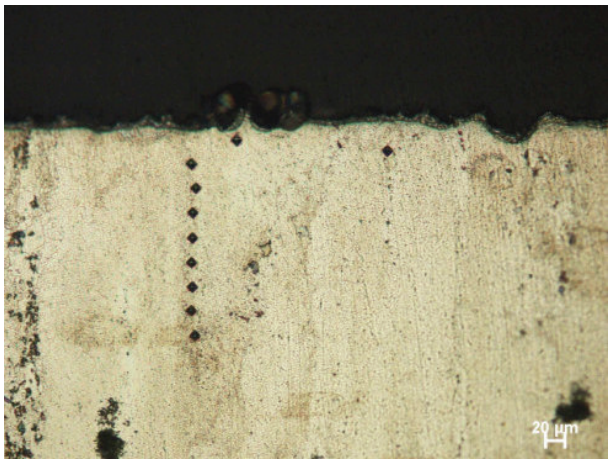


Şekil 6.116 AA 7075 alüminyum alaşımı için XRD sonuçları

6.6.6 AA 7075 için parametrelerin seçilen değerlerinin sertlikteki değişimlere etkisi

Lazerle oyulmuş yüzeyin hemen alt tabakasından işlenmiş yüzeye dik kesitte Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yeniden katılaşmış tabaka ve bu tabakanın hemen altında kalan yapı için 25µm aralıklarla, 10sn. süreyle ve 10gr. yükle sertlik ölçümü ve mesafeye bağlı olarak sertlik dağılımı analizi yapılmıştır.

Yeniden katılaşmış tabakada boşluklar, çatlaklar ve süreksizliklerinin olması bu bölgelerde sertlik ölçümü için iz oluşturulmasında zorluklara sebep olmuştur. Şekil 6.117'de sertlik izleri görülmektedir. 10gr. yükte yapılan ölçümlerde iz genişliği yaklaşık 14µm olarak ölçülmüştür. Yeniden katılaşmış tabakada boşluksuz bölgelerde ve iz oluşturulabilecek bölgelerden başlayarak 25µm aralıklarla yapılan sertlik ölçümlerinin sonuçları listelenmiş halde Çizelge 6.9 ve grafiksel olarak da Şekil 6.118 -121'de görülmektedir.



Şekil 6.117 AA 7075 alüminyum alaşımı için sertlik ölçüm örneği görüntüsü

Çizelge 6.9 AA 7075 alüminyum alaşımı için sertlik ölçüm sonuçları

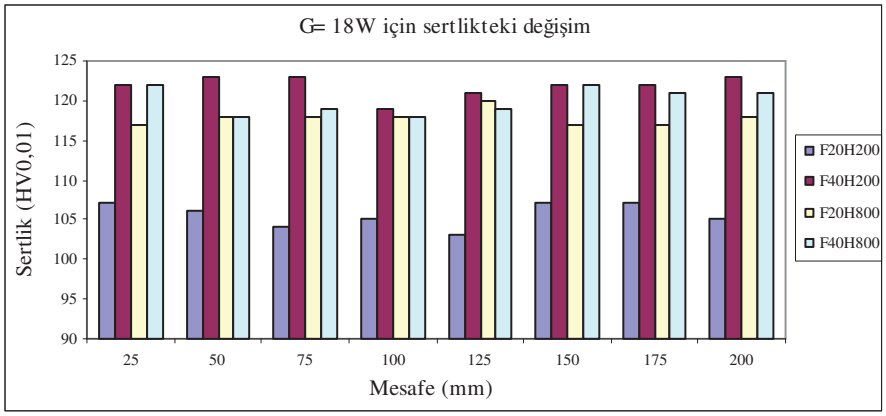
No	Parametreler			Mesafe (µm) / Vickers sertlik (HV)							
	G(W)	H(mm/s)	F(kHz)	*25 (µm)*	*50 (µm)*	*75 (µm)*	*100 (µm)*	*125 (µm)*	*150 (µm)*	*175 (µm)*	*200 (µm)*
1	18	200	20	107	106	104	105	103	107	107	105
2	18	200	40	122	123	123	119	121	122	122	123
3	18	800	20	117	118	118	118	120	117	117	118
4	18	800	40	122	118	119	118	119	122	121	121
5	30	200	20	111	111	116	117	115	119	114	117
6	30	200	40	115	114	116	116	117	117	118	117
7	30	800	20	110	112	112	111	106	104	105	105
8	30	800	40	119	118	119	116	119	117	114	117

Çizelge 6.9'daki sonuçlar incelendiğinde her bir deney koşulu kendi içinde değerlendirildiğinde mesafeye bağlı olarak sertlikte belirgin bir değişim tespit edilememiştir. Farklı parametrelerin oluşturduğu deney koşullarına göre inceleme yapıldığında sertlikte değişimler tespit edilmiş ancak sertlik değerleri arasında büyük farklılıklar tespit edilememiştir.

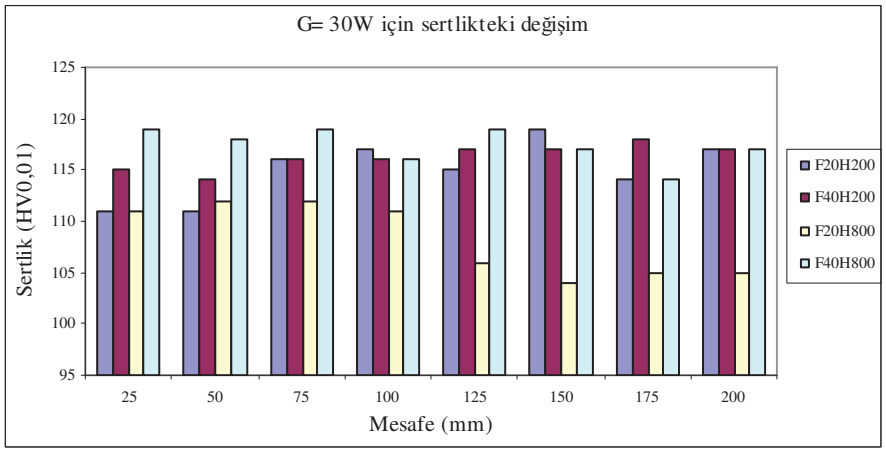
Şekil 6.118'de ve 121'de, sabit hızda artan frekans, sertlikte artış meydana getirmiştir. Sabit hızda ve yüksek frekansta yapılan deney koşullarında atım çakışma miktarı en yüksek değerindedir. Atım çakışma miktarının yüksek olması birim alandaki ısı yoğunluğunu arttırdığı için buharlaşma sonrası ergimiş metalin soğuması için geçen süre soğuma süresinin uzamasına sebep olmaktadır. Bu durumun sertlik değerinin yüksek olmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.118'de 18W etkin güçte frekansın 20kHz'deki değeri için artan hız, sertlikte artış meydana getirmiştir. Buna karşın, frekansın 40kHz'deki değeri için tam tersi bir durum gerçekleşmiştir. Şekil 6.119'da 30W etkin güçte frekansın

20kHz'deki değeri için artan hız sertlikte azalma meydana getirmiştir. Buna karşın, frekansın 40kHz'deki değeri için tam tersi bir durum gerçekleşmiştir.

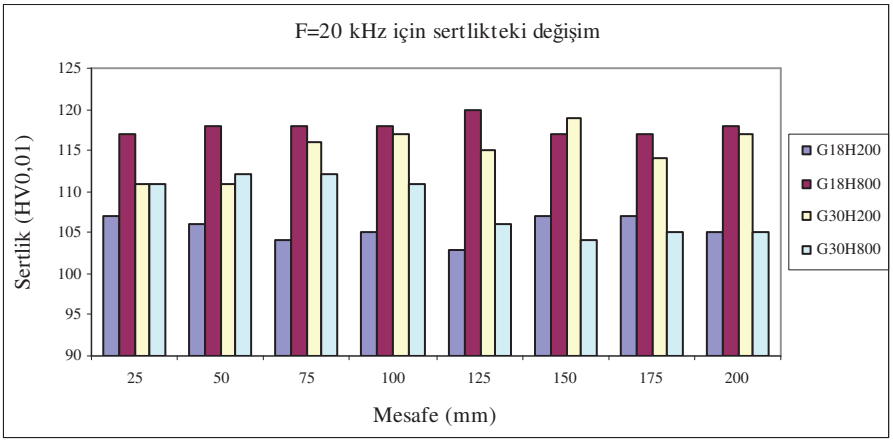


Şekil 6.118 AA 7075 alüminyum alaşımı için 18W etkin güçte sertlik değişimi

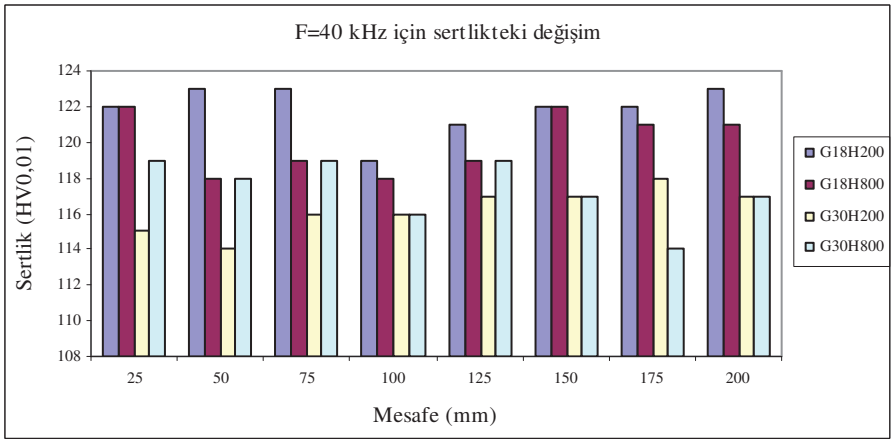


Şekil 6.119 AA 7075 alüminyum alaşımı için 30W etkin güçte sertlik değişimi

Şekil 6.120'de frekansın 20kHz'deki değeri için 200mm/s'de artan güç sertlikte artış meydana getirmiştir. Buna karşın, 400mm/s'de artan güç sertlikte azalma meydana getirmiştir. Şekil 6.121'de frekansın 40kHz'deki değeri için 200mm/s'de artan güç sertlikte azalma meydana getirmiştir. Buna karşın, 400mm/s'de artan güç sertlikte artış meydana getirmiştir. 20kH ve 40kHz'de zıt sonuçlar elde edilmiştir ki bu durum artan frekansın çakışma oranındaki artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.120 AA 7075 alüminyum alaşımı için 20kHz'deki frekans için sertlik değişimi

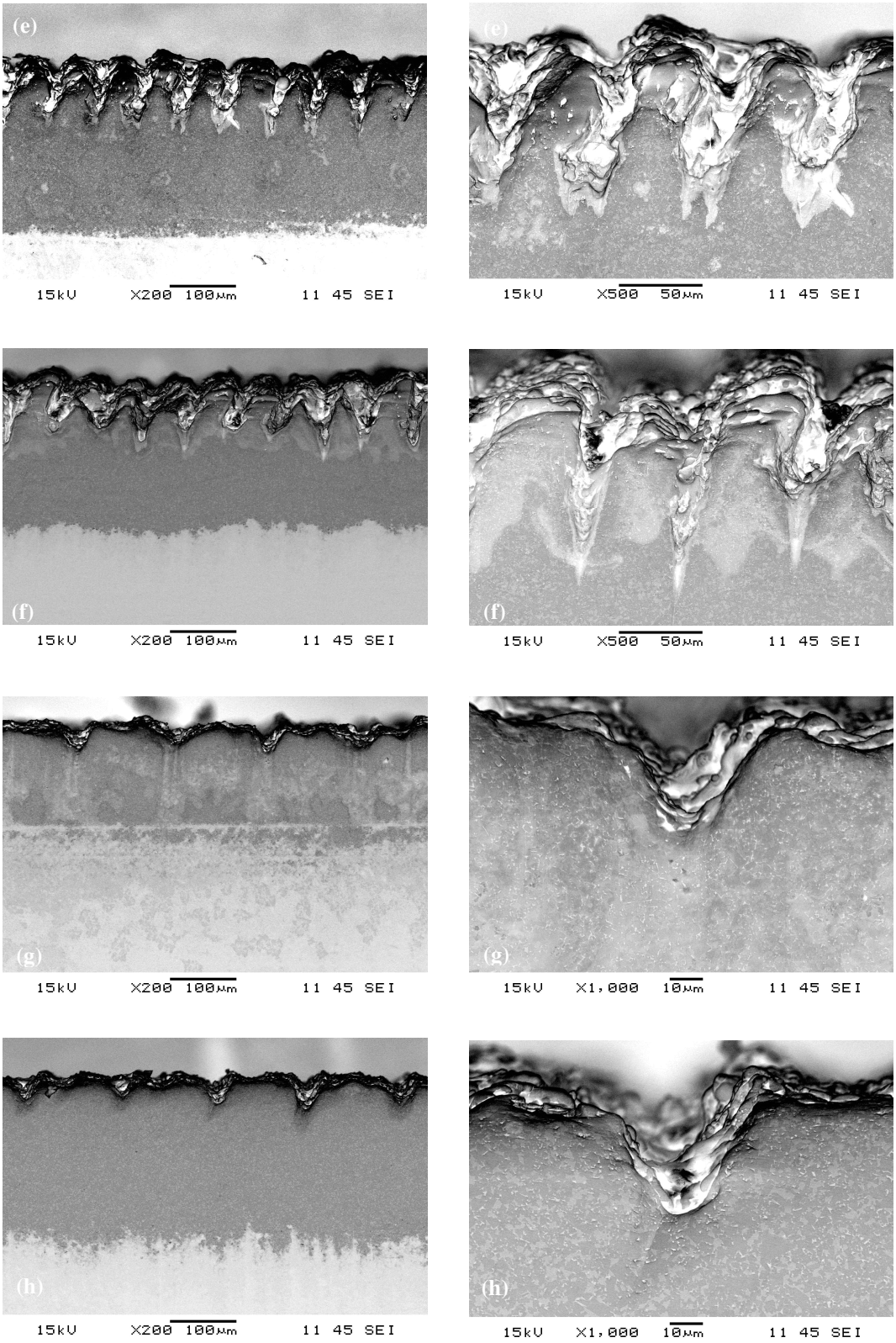


Şekil 6.121 AA 7075 alüminyum alaşımı için 40kHz'deki frekans için sertlik değişimi

6.6.7 Tungsten Karbür için parametrelerin seçilen değerlerinin mikroyapıdaki değişimlere etkisi

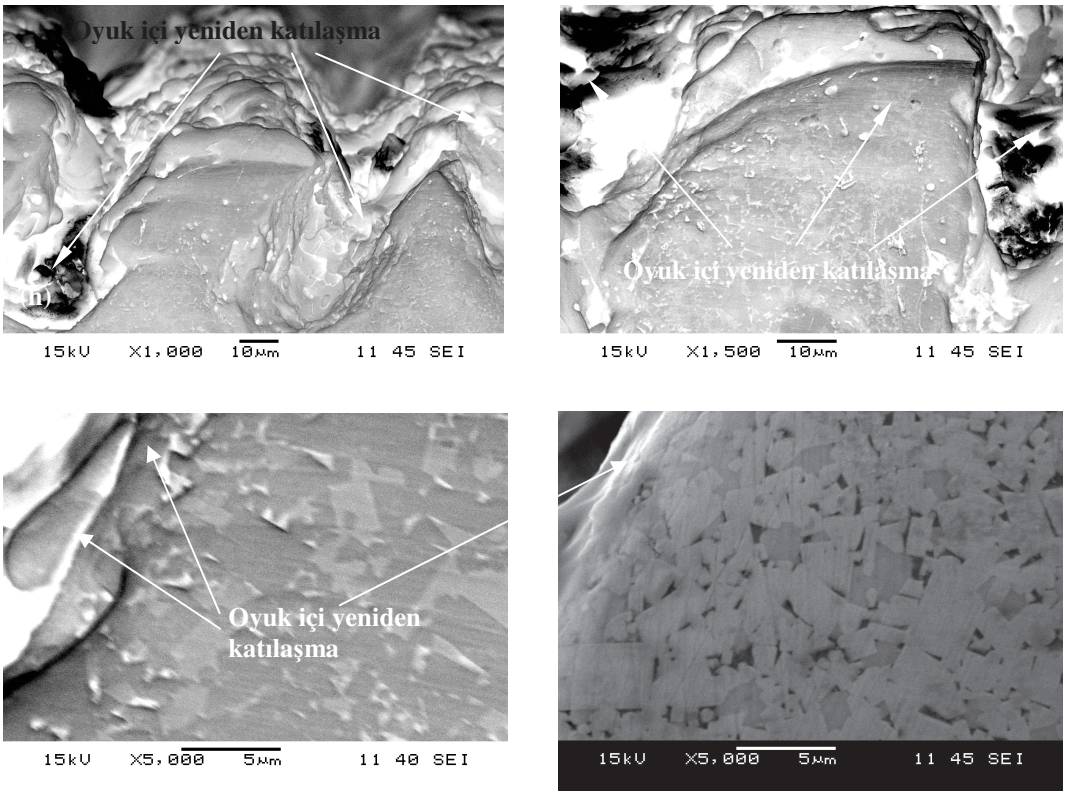
Çizelge 6.4'de Tungsten Karbür için parametrelerin seçilen değerlerine göre oluşturulan deney koşulları görülmektedir. Bu deney düzenine göre yapılan oyma işlemeleri için Vickers sertlik ölçümleri ve 30W etkin güçte kesit görüntüleri için SEM incelemeleri yapılmıştır.

Şekil 6.122'de Tungsten Karbür malzemeye uygulanan lazer oyma işlemi sonrasındaki kesit yüzey görüntüleri görülmektedir. Yüzey görüntüleri incelendiğinde lazer ışının meydana getirdiği oyuk içinde ve oyuk yan duvarlarından yüzeye doğru ergimiş ve yeniden katılaşmış bir tabaka görülmektedir. Bu tabaka yüzeyde ana yapıdan farklı bir tabaka görüntüsü vermektedir. Fotoğraflarda, bu tabakanın kalınlığının farklılık gösterdiği ve en kalın tabakanın (e) ve (f) koşullarında oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, (e)'deki görüntüde oyuklar arasında bir bağ oluştuğu görülmektedir. (g) ve (h) koşullarında yapılmış SEM inceleme fotoğraflarında oyuk içinde yeniden katılaşan tabakanın kalınlığının düşük olduğu görülmektedir. Bu koşullarda hız yüksektir ve yüksek hız, düşük ısı girdisi ile buharlaşma sonrasında geride kalan ergimiş metalin miktarının ve ısı etkisindeki alanın derinliğinin düşük olması yeniden katılaşan tabakanın kalınlığını azalttığı düşünülmektedir. Şekil 6.123'de oyuk içi ve yüzeye doğru yönelen yeniden katılaşmış yapı görülmektedir. Fotoğrafların hepsinde oyuk içinde ve yüzeyde katılaşma sonrasında yeniden katılaşan tabakanın yüzeyle birleşme durumunda bazı süreksizliklerin olduğu görülmektedir. Bu süreksizliğin iki sebebinin olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri, Tungsten Karbürün yapısından kaynaklanan boşluklu yapının ergime ve buharlaşma ile birlikte varlığını sürdürmesi ve ergimiş metalin boşlukları dolduramaması, diğeri de katılaşmanın hızlı gerçekleşmesi sonucu Tungsten Karbürdeki boşluklu bölgelerin dışında kalan bölgelerle ergimiş metalin bağ oluşturma eğilimidir.



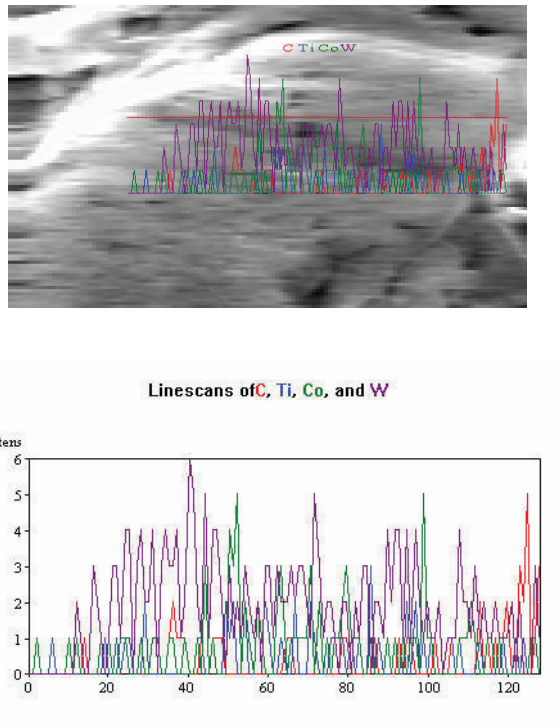
Şekil 6.122 Tungsten Karbür için SEM inceleme görüntüleri

(e) G= 30W, H=200mm/s, F=20kHz
(f) G= 30W, H=200mm/s, F=30kHz
(g) G= 30W, H=400mm/s, F=20kHz
(h) G= 30W, H=400mm/s, F=30kHz



Şekil 6.123 Tungsten Karbür için oyuk içi yeniden katılaşmış tabaka

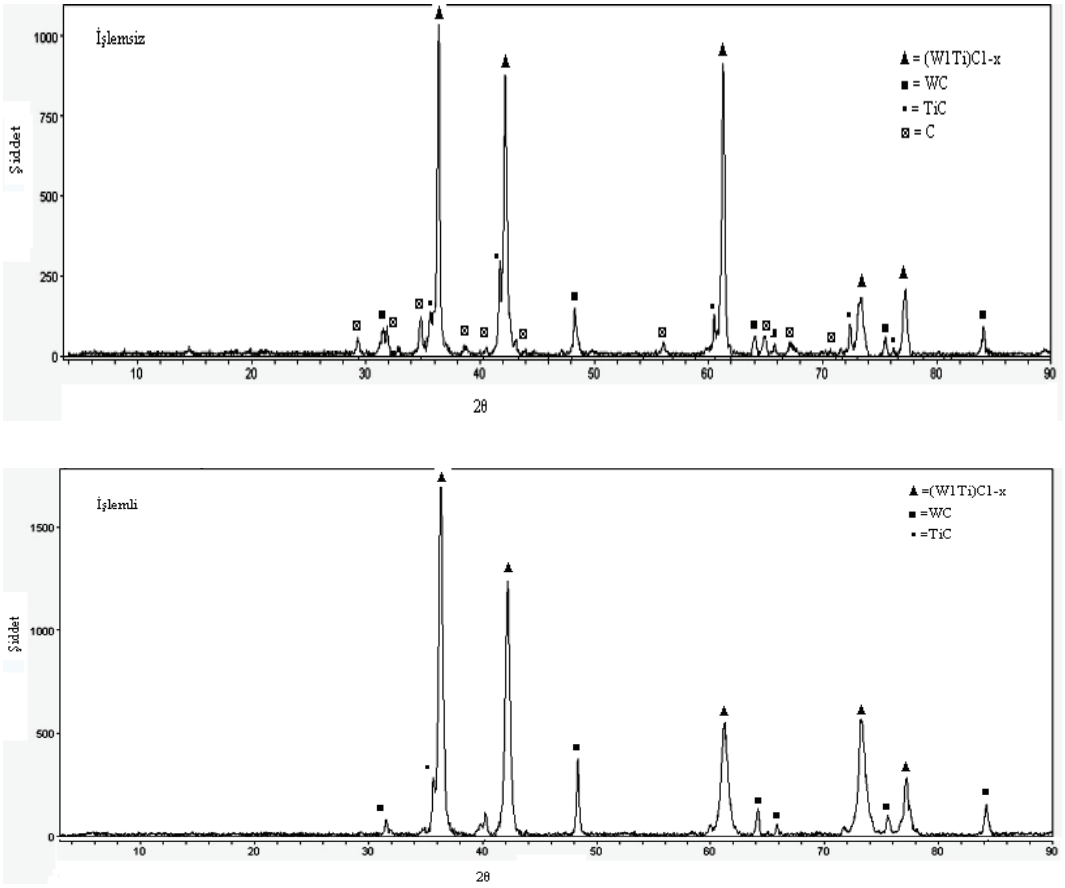
Oyuk içinde ve yüzeyde katılaşmış yapıyı da içine alacak şekilde bir çizgi boyunca EDS analizi yapılmıştır. Bu analiz sonucu Şekil 6.124'de görülmektedir.



Şekil 6.124 Tungsten Karbür için yeniden katılaşmış tabaka ve bu tabaka dışında kalan bölge için EDS analizi

SEM incelemelerinde sonrasında yüzeyde ve oyukta görülen bu tabakanın nasıl bir fazdan oluştuğunu tanımlayabilmek için XRD analizi yapılmıştır.

Şekil 6.125'de yüzeyi işlem görmemiş ve yüzeyi lazerle işlenmiş metale uygulanan XRD analiz sonuçları görülmektedir. Analiz sonucunda işlem görmemiş işparçası yüzeyinde TiC, $(W,Ti)C_{1-x}$, W_2C, WC, $Co_6W_6C_6$ pikleri tespit edilmiştir ve en büyük pikler titanyum tungsten karbüre ($(W,Ti)C_{1-x}$) aittir. Yüzeyi işlenmiş işparçası için yapılan XRD analiz sonucunda yapıda TiC, $(W,Ti)C_{1-x}$, W_2C, WC pikleri tespit edilmiştir. İşlemsizde olduğu gibi en büyük pikler titanyum tungsten karbüre ($(W,Ti)C_{1-x}$) ait olduğu tespit edilmiştir.

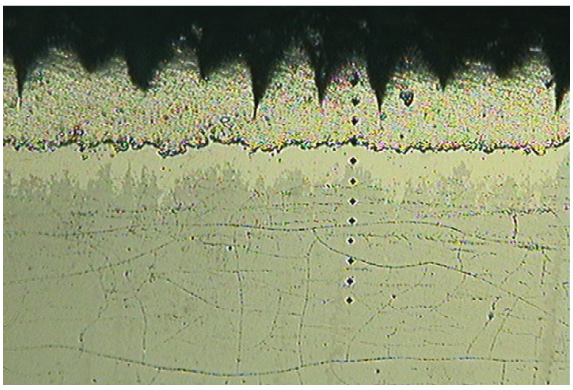


Şekil 6.125 Tungsten Karbür için işlemli ve işlemsiz yüzeyin XRD analizi

6.6.8 Tungsten Karbür için parametrelerin seçilen değerlerinin sertlikteki değişimlere etkisi

Tungsten Karbür için oyulmuş yüzeyin hemen alt tabakasından işlenmiş yüzeye dik kesitte Vickers sertlik ölçümleri yapılmıştır. Yeniden katılaşmış tabakanın alt kısmında kalan yapı için 25μm aralıklarla 10sn. süreyle ve 50gr.

yükle sertlik ölçümü yapılmıştır ve mesafeye bağlı sertlik dağılımı analizi yapılmıştır. Şekil 6.126'de ölçüm aralıkları ve Şekil 6.129 - 132'de ölçüm sonuçları görülmektedir. Sertlik ölçümlerine ait sonuçlar Çizelge 6.10'de listelenmiştir.



Şekil 6.126 Tungsten Karbür için sertlik ölçüm örneği görüntüsü

Çizelge 6.10 Tungsten Karbür için sertlik ölçüm sonuçları

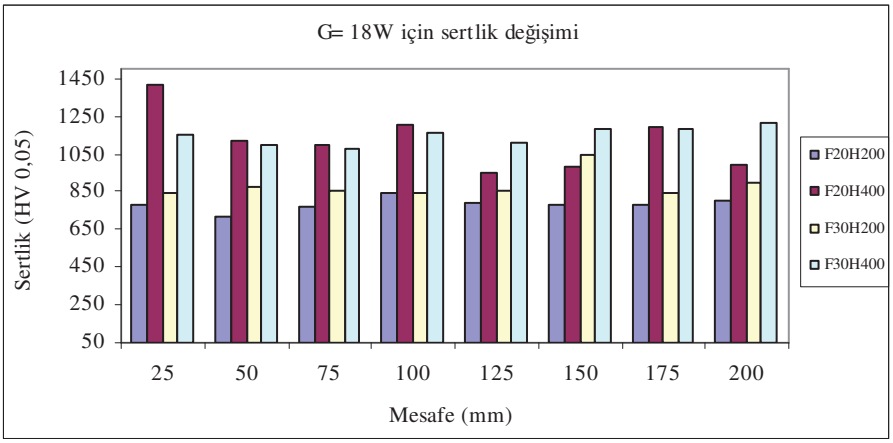
No	Parametreler			Mesafe (µm) / Vickers sertlik (HV)							
	G (W)	H (mm/s)	F (kHz)	*25 (µm)*	*50 (µm)*	*75 (µm)*	*100 (µm)*	*125 (µm)*	*150 (µm)*	*175 (µm)*	*200 (µm)*
1	18	200	20	781	713	769	842	787	781	783	803
2	18	200	30	849	872	858	843	851	1046	845	895
3	18	400	20	1415	1120	1103	1206	948	979	1188	993
4	18	400	30	1146	1102	1073	1165	1108	1181	1183	1214
5	30	200	20	1240	1226	1253	1309	1284	1238	1152	1297
6	30	200	30	1260	1158	1246	1283	1214	1249	1349	1340
7	30	400	20	1397	1239	1293	1225	1202	1270	1277	1304
8	30	400	30	1320	1244	1329	1054	1256	1291	1248	1291

Sertlik ölçümlerinin Çizelge 6.10'daki rakamsal ve Şekil 6.126'daki grafiksel gösterimine göre, etkin gücün 18W'daki değeri için sabit frekansta artan hız sertlik değerini arttırmıştır. 18W etkin güç için hızın 400mm/s'deki değeri sertlikte belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 18W etkin gücün 400mm/s ve 30kHz'deki deney koşulu için diğer koşullarında sertlikteki değişim, ihmal edilebilir bir değer göstermiştir.

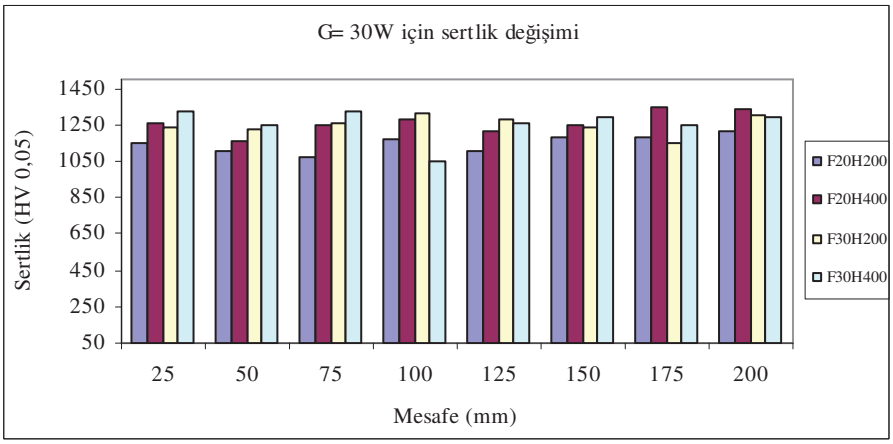
Şekil 6.127'de 30W etkin güçte yapılan oyma işlemine ait sertlik değerlerinin grafiksel gösterimi görülmektedir. 20kHz'de artan tarama hızıyla birlikte sertlikte artış tespit edilmiştir. 30kHz için 100µm'deki mesafede yapılan sertlik ölçüm sonucu dışında genel eğilim artan hızla birlikte sertlikte artışın

meydana geldiği yönündedir. Ancak sertlikteki değişim çok yüksek değildir hatta bazı mesafeler için sertlik değerleri neredeyse aynıdır.

Şekil 6.128'de 20kHz frekansta değişken hız ve güç için sertlikteki değişim görülmektedir. 200mm/s hız için artan güç sertlikte artış meydana getirmiştir. 400mm/s için 25µm'deki sertlik değeri hariç, sertlik değişimindeki eğilim 200mm/s'deki değişimle ile aynıdır.



Şekil 6.126 Tungsten Karbür için 18W etkin güçte sertlik değişimi

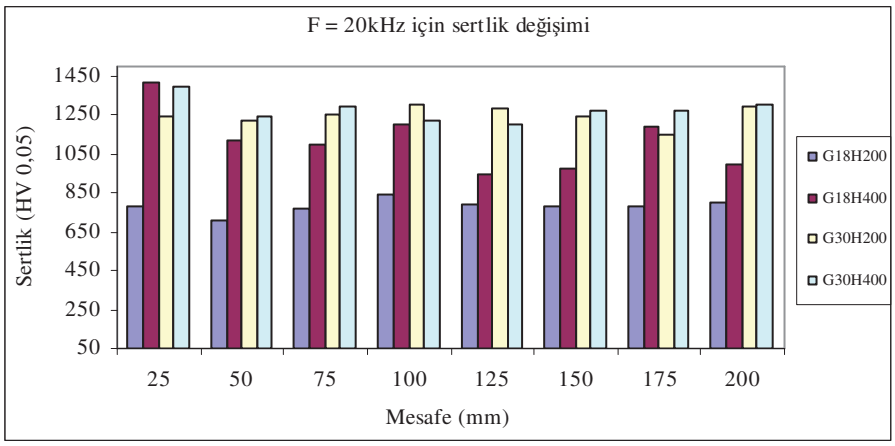


Şekil 6.127 Tungsten Karbür için 30W etkin güçte sertlik değişimi

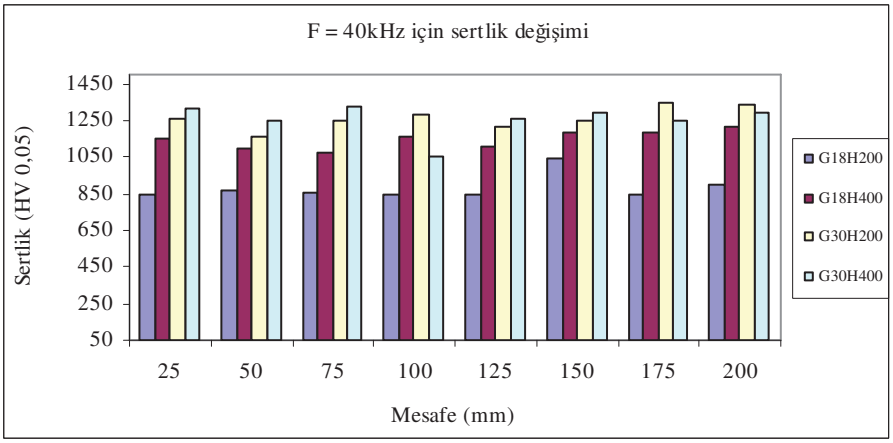
Şekil 6.129'da ve Çizelge 6.10'da frekans 40kHz'de sabitken hem 200mm/s hem de 400mm/s için sertlik ölçüm sonuçları göstermektedir ki, artan güç sertlikte artış meydana getirmektedir.

Lazerle yüzeyi oyulma işlemine tabi tutulmuş Tungsten Karbür malzemenin merkez sertlik değerini tespit etmek için merkezde farklı bölgelerde sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonucunda merkez sertlik değerleri 1275, 1242,

1358 HV olarak ölçülmüştür. İşlem görmemiş malzemenin sertliği ise 1352, 1403 HV olarak ölçülmüştür.

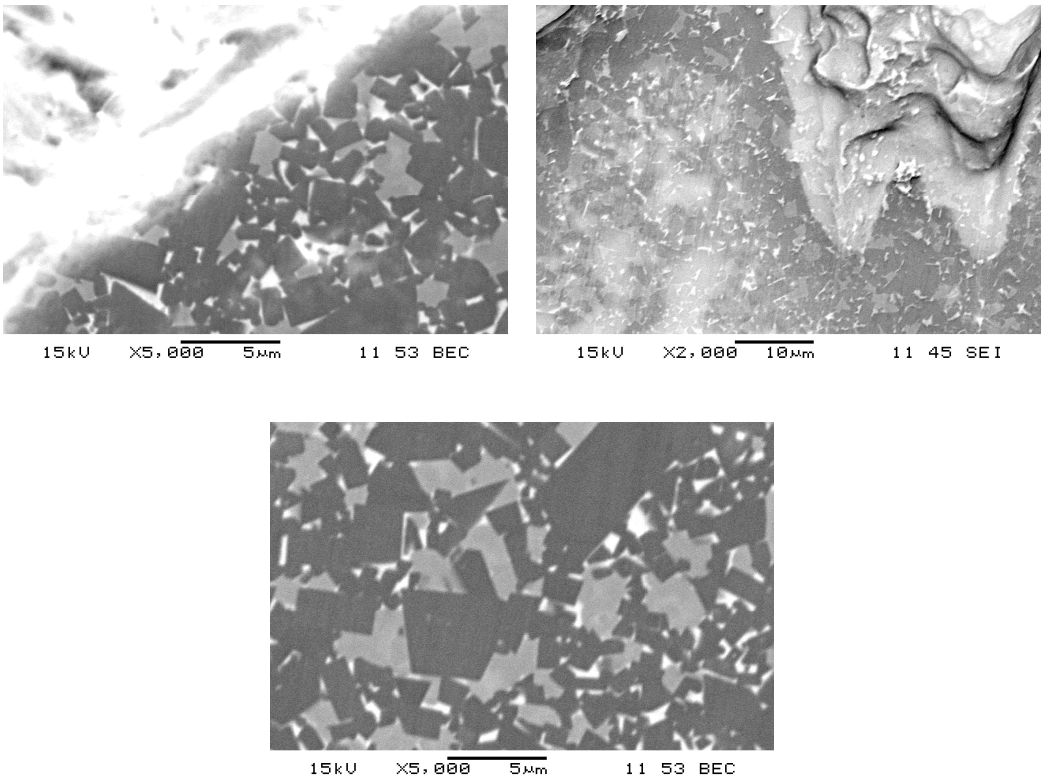


Şekil 6.128 Tungsten Karbür için 20kHz'deki frekans için sertlik değişimi



Şekil 6.129 Tungsten Karbür için 40kHz'deki frekans için sertlik değişimi

Tungsten Karbür, WC ile Co tozlarının sinterlenmesi ile üretilen ve sertliği çok yüksek bir malzemedir. Şekil 6.130'da, mikroyapı örneklerinde sinterlenme sonucu partiküller arasında boşlukların ve partiküllerin dağılımının homojen olmadığı görülmektedir. Sertlik izinin geldiği bölgedeki partikül dağılımındaki farklılığın sertlik değişiminde etkili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.130 Tungsten Karbür için sertlik ölçümü yapılan bölgelere ait mikroyapı örnekleri

7. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Birden çok faktörün etkili olduğu bir sistemde her bir faktörün farklı değerlerinin sistemden beklenen cevaba olan etkilerinin incelenmesi gerektiğinde faktöriyel deney düzenin kurulması sistem için en verimli araçları sunmaktadır (Montgomery, 2001). Faktöriyel düzende, faktörlerin her bir değeri için etkileşimler oluşturulmaktadır ve bu etkileşimlere sistemin verdiği cevap ölçülebilmektedir. Bu şekilde sistem için tüm mevcut kombinasyonlar incelenmiş olmaktadır. Bu kombinasyonlar içinde sistemin vereceği en iyi ve en kötü cevap tespit edilebilir. Ancak elde edilen en iyi cevap parametreler için önceden belirlenen değerler için oluşturulan deney koşulundaki sonuçtur. Elde edilen sonuç, beklenmeyen bir sonuç da olabilir. Bu durumda en iyi cevaba ulaşmak için bazı durumlarda, deney koşullarını oluşturan değerlerin sayısını arttırmak gerekebilir. Bu durumda, zaman ve maliyet kayıpları söz konusu olacaktır.

İmalat endüstrisinde mevcut şartlarda prosesteki değişkenlerin farklılıklarının ortaya çıkarılmasında prosese etki eden faktörlerin ve bu faktörlerin farklı değerlerinin meydana getirdiği kombinasyonların her birinin etkileri deneylerle belirlenebileceği gibi istatistiksel deney tasarım yöntemleriyle de belirlenebilmektedir. Deney tasarımı yöntemiyle proses performansına etki eden faktörlerin ve düzeylerinin belirlenmesine yönelik ilk istatistiksel çalışmalar 1920'lerde istatistikçi R.A. Fisher tarafından tarımsal uygulamalar için gerçekleştirilmiştir. İmalat endüstrisindeki uygulamaları 1980'lerde G.Taguchi tarafından başlatılmış ve üretimde sağladığı olumlu sonuçlar bu yöntemin uygulama alanını genişletmiştir.

Optimal deney şartlarının belirlenmesine yönelik birçok deneysel yöntem bulunmaktadır. Bunlar arasında en güçlü araçlar istatistiksel deney tasarım yöntemleridir ve üç farklı deney tasarım yöntemi; faktöriyel tasarım, cevap yüzey metodolojisi ve Taguchi metodu kalite kontrolde sıklıkla kullanılmaktadır. Endüstride metal işleme uygulamalarında Taguchi metodu en güvenilir sonuçları vermesi sebebiyle tercih edilmektedir. Bununla birlikte cevap yüzey metodu ise birinci ve ikinci dereceden regresyon modellerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

Taguchi metodunda amaç, ürünü etkileyen ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı kontrol edilebilen faktörlerin değerlerini optimal seçerek üründeki ve prosesteki varyasyonu en aza indirmektedir [Melkote et al., 2009]. Taguchi kayıp

fonksiyonu, beklenen hedef değerle deneysel değer arasındaki sapmadır ve sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek hesaplanır. S/N oranının hesaplanmasında sıklıkla kullanılan üç farklı karakteristik; Hedef (nominal) değer en iyi, en küçük en iyi ve en büyük en iyidir. Literatürdeki çalışmaların hepsinde yüzey işlemleri sonrasında en iyi yüzey pürüzlülüğünün ve en yüksek oyma derinliğinin elde edilmesine yönelik yapılan çalışmalarda sırasıyla en küçük en iyi ve en büyük en iyi S/N performans karakteristiği kullanılmıştır. Bu çalışmada en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri, iyi bir yüzey kalitesini ifade edeceğinden en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır. En büyük oyma derinliği değeri için ise en büyük en iyi S/N karakteristiği kullanılmıştır. Bu kapsamda deneysel çalışmalarda kullanılacak S/N oranı formülleri aşağıdaki 7.1 ve 7.2 deki denklemlerde gösterildiği gibidir.

En küçük en iyi:

$$\eta = S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i^2\right) \tag{7.1}$$

En büyük en iyi:

$$\eta = S/N = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i^2}\right) \tag{7.2}$$

Burada, R: Performans karakteristik değeri, sistemin cevabı (Yüzey pürüzlülüğü ya da oyma derinliği)

n: Deney sayısı

Burada amaç S/N oranını maksimize etmektir [Slocombe and Li, 2000]. Dolayısıyla değerlendirmelerde her iki S/N oranı için en büyük S/N oranı en iyi sonucu belirlemede kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen verilerin analizi için ve parametrelerin çıktı (yüzey pürüzlülüğü yada oyma derinliği) üzerindeki etkilerinin istatistiksel olarak güvenirliliğinin belirlenmesinde ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenlik meydan getirdiğini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılır [Melkote et al., 2009]. Parametrelerin S/N oranlarını kullanarak çıktıyı istatistiksel olarak ne ölçüde etkilediğini inceleyebilmek için ANOVA aşağıdaki formülleri kullanır.

$$SS_m = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \eta_i\right)^2 \tag{7.3}$$

$$SS_A = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\eta_{Ai}^2 - SS_m \tag{7.4}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{n}\eta_i^2 - SS_m \tag{7.5}$$

$$SS_E = SS_T - \sum SS_A \tag{7.6}$$

$$V_A = \frac{S_A}{f_A} \tag{7.7}$$

$$F_{AO} = \frac{V_A}{V_E} \tag{7.8}$$

$$P = \frac{SS_A}{SS_E} x100 \tag{7.9}$$

Burada,

SS_m,Ortalamanın kareleri toplamı; SS_A, A. Parametrenin kareleri toplamı; SS_T, Toplam karelerin toplamı; SS_E, Hatanın kareleri toplamı; N, Parametrenin düzey sayısı; n, Toplam deney sayısı; η_i, i. Deneyin Ra yada D için hesaplanan S/N değeri, η_{Ai}, A. Parametrenin i. düzeyindeki S/N oranı; f_A, A. Parametrenin serbestlik derecesi; V_A, A. Parametrenin varyansı; V_E, Hatanın varyansı; F_{AO}, A. Parametrenin F-test değeri; A = H, G, F, TA. parametreleri; P, Katkı yüzdesi

Bu çalışmada kullanılan deney malzemeleri (AISI H13, AISI 316 ve AA 7075) için oluşturulan deney düzeni için Çizelge 7.1'de görülen faktörler ve değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.1 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 için lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri

Parametreler	Sembol - Birim	Değerler			
Etkin güç	G - W	18	24	30	-
Frekans	F - kHz	20	30	40	-
Hız	H - mm/s	200	400	600	800
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	0,04	-

Tungsten Karbür'e ait deney düzeni için Çizelge 7.2'de görülen faktörler ve değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.2 Tungsten Karbür için lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri

Parametreler	Sembol - Birim	Değerler	
Etkin güç	G - W	18	30
Tarama hızı	H - mm/s	200	400
Frekans	F - kHz	20	30
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03

İşlem tarama yönünün etkilerinin tespitine yönelik AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 alüminyum alaşımına ait deney düzeni için Çizelge 7.3'de görülen faktörler ve değerleri kullanılmıştır. İşlem tarama yönünde etkin güç 24W'ta sabit tutulmuştur.

Çizelge 7.3 AISI H13, AISI 316 ve AA 7075 malzemeleri için yüzey işlem yönünün etkisinin tespitine yönelik lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri

Parametreler	Sembol / Birim	Değerler				
Hız	H - mm/s	400	600	800	-	-
Frekans	F - kHz	20	30	40	-	-
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	0,04	-	-
Tarama Yönü	TY - (°)	45°	0°	45°/-45°	90°/0°	45°/0°

Tungsten Karbür'e ait deney düzeni için Çizelge 7.4'de görülen faktörler ve değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 7.4 Tungsten Karbür için yüzey işlem yönünün etkisinin tespitine yönelik lazer oyma işlem parametreleri ve değerleri

Parametreler	Sembol / Birim	Değerler				
Hız	H - mm/s	200	400	-	-	-
Frekans	F - kHz	20	30	-	-	-
Tarama aralığı	TA - mm	0,02	0,03	-	-	-
Tarama Yönü	TY - (°)	45°	0°	45°/-45°	90°/0°	45°/0°

7.1 AISI H13 Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

AISI H13 takım çeliği için yapılan oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğünün ve oyma derinliğinin istatistiksel analizi aşağıdaki gibi dört ayrı başlıkla değerlendirilmiştir.

7.1.1 AISI H13 takım çeliği için temel parametrelere ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI H13 takım çeliğinin yüzey pürüzlülüğü (Ra) analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.5'de listelenmiştir.

Çizelge 7.5'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.1'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 1. seviye (18W), frekans için 1. seviye (20kHz), hız için 4. seviye (800mm/s) ve tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 1,75µm'dir.

Çizelge 7.5 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	-13,23*	-15,10*	-22,68	-16,72
2	-16,31	-16,59	-16,79	-15,40*
3	-19,12	-16,97	-13,48	-16,55
4			-11,94*	

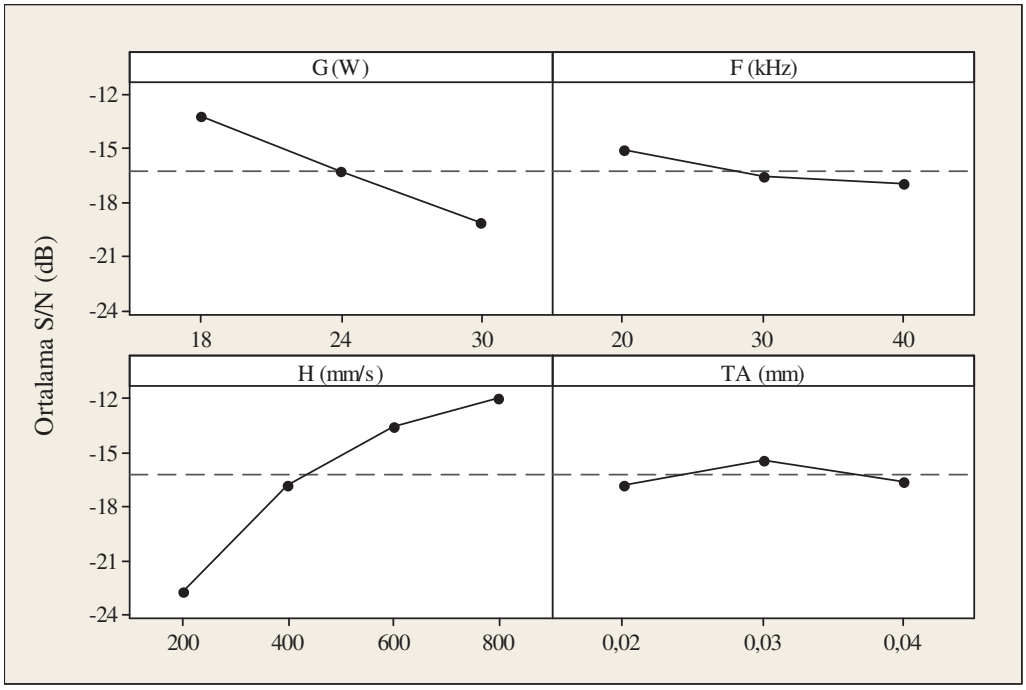
* Optimum seviye

Çizelge 7.6, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde, F*TA ve H*TA ikili etkileşimi hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde temel parametrelerden frekans ve tarama aralığının etki oranının, güç ve tarama hızının etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %58,93'dür. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %58,93'lük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre güçtür ve etki yüzdesi %20,13'dür. Tarama hızı ve güç için elde edilen bu sonuç parametrelerin temel etkisindeki sonuçla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 7.6 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	625,78	174,67	0,000	20,13
Frekans (F)	2	69,87	19,50	0,000	2,25
Hız (H)	2	1831,93	340,88	0,000	58,93
Tarama aralığı (TA)	2	37,19	10,38	0,000	1,20
G*F	4	223,94	31,25	0,000	7,20
G*H	6	113,13	10,53	0,000	3,64
G*TA	4	32,82	4,58	0,002	1,06
F*H	6	32,87	3,06	0,010	1,06
F*TA	4	6,97	0,97	0,428	0,22
H*TA	6	12,31	1,15	0,346	0,40
Hata	68	121,81			3,92
Toplam	107	3108,64			100,00

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda frekansın yüzey pürüzlülüğündeki etkinliğinin çok belirgin olmadığı ve frekans için elde edilen sonuçların çok yakın çıktığı tespit edilmişti. İstatistiksel analiz sonucunda frekans ve tarama aralığının %95 güven düzeyi için anlamlı (0,000<0,05) olsa bile etki yüzdeleri sırasıyla %2,25 ve %1,20 çıkmıştır ve bu değerler hız ve güç ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek kadar küçüktür.



Şekil 7.1 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.1.2 AISI H13 takım çeliği için temel parametrelerin oyma derinliğine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI H13 takım çeliğinin oyma derinliğinin analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.7'de listelenmiştir.

Çizelge 7.7'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.2'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 3. seviye (30W), frekans için 3. seviye (40kHz), hız için 1. seviye (200mm/s) ve tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir.

Çizelge 7.7 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranları

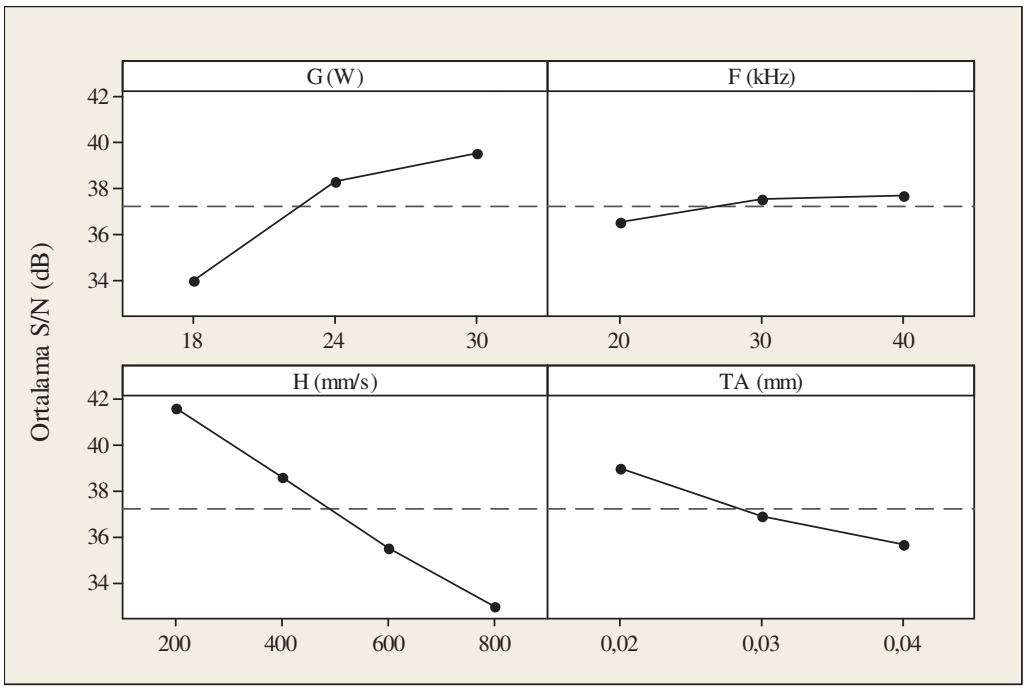
Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	33,95	36,47	41,63*	38,99*
2	38,22	37,50	38,66	36,97
3	39,47*	37,66*	35,58	35,67
4			32,99	

* Optimum seviye

Çizelge 7.8, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde G*TA, F*TA ve H*TA hariç diğer tüm parametreler ve parametrelerin ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %48,82'dir. Bu durum en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %48,82'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre etkin güçtür ve etki yüzdesi %25,85'dir. Tarama aralığı, yüzey pürüzlülüğü için istatistiksel olarak belirgin bir etki göstermezken oyma derinliğinde tarama hızı ve güçten sonraki en yüksek etkiyi göstermiştir ve etki yüzdesi 8,66'dır. Şekil 7.2'deki grafiksel gösterimde frekansın 30kHz ve 40kHz'deki değerleri arasında belirgin bir değişim görülmemiştir. Tarama hızı, güç ve tarama aralığı için elde edilen bu sonuç parametrelerin temel etkisindeki sonuçla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 7.8 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	601,80	179,88	0,000	25,85
Frekans (F)	2	29,90	8,94	0,000	1,28
Hız (H)	2	1136,39	226,45	0,000	48,82
Tarama aralığı (TA)	2	201,63	60,27	0,000	8,66
G*F	4	106,44	15,91	0,000	4,57
G*H	6	99,81	9,94	0,000	4,29
G*TA	4	1,21	0,18	0,948	0,05
F*H	6	25,27	2,52	0,029	1,09
F*TA	4	5,87	0,88	0,483	0,25
H*TA	6	5,81	0,58	0,746	0,25
Hata	68	113,75			4,89
Toplam	107	2327,88			100,00



Şekil 7.2 AISI H13 takım çeliği için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.1.3 AISI H13 takım çeliği için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI H13 takım çeliğinin işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre

parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.9'da listelenmiştir.

Çizelge 7.9'daki S/N oranlarına ve Şekil 7.3'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 3.seviye (800mm/s), frekans için 3. seviye (40kHz), tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) ve tarama yönü için (90°/0°) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 2,99µm'dir.

Çizelge 7.9 AISI H13 takım çeliği için yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

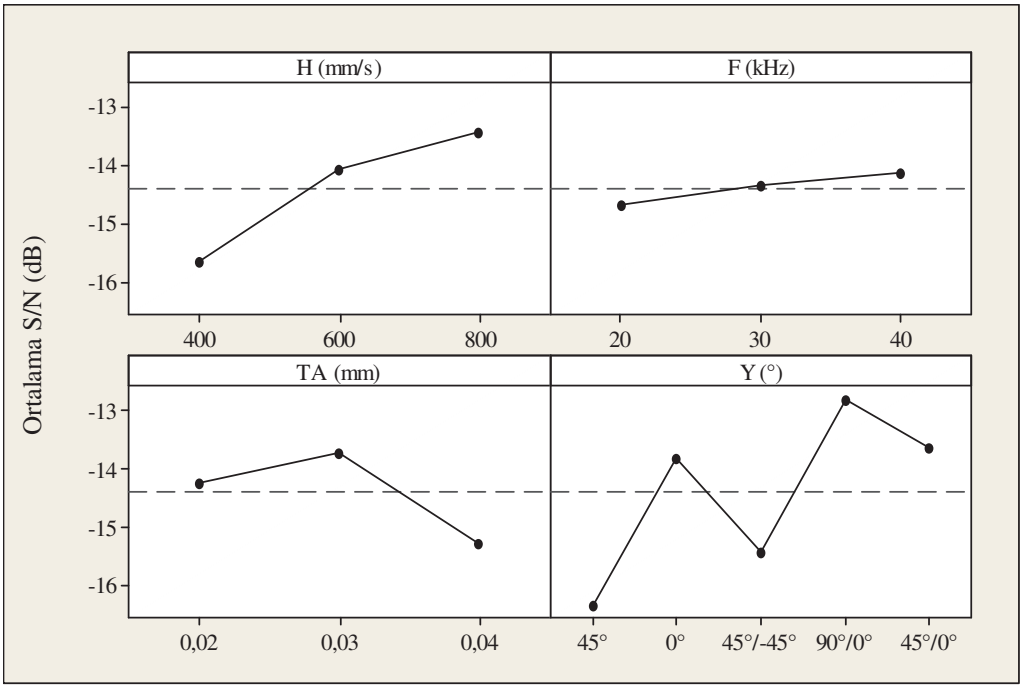
Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	-15,66	-14,69	-14,23	-16,33
2	-14,07	-14,35	-13,69*	-13,79
3	-13,43*	-14,13*	-15,25	-15,42
4				-12,78*
5				-13,62

* Optimum seviye

Çizelge 7.10, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, F*TA, H*TA, F*Y ve TA*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde frekansın etki oranının (0,96), hız ve tarama yönünün etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama yönü göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %30,65'dir. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin genel etkisi içinde tarama yönünün %30,65'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama yönünden sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama hızıdır ve etki yüzdesi %16'dır.

Çizelge 7.10 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	118,311	43,50	0,000	16,00
Frekans (F)	2	7,095	2,61	0,079	0,96
Tarama aralığı (TA)	2	56,308	20,70	0,000	7,62
Tarama Yönü (°)	4	226,628	41,67	0,000	30,65
H*F	4	32,221	5,92	0,000	4,36
H*TA	4	11,028	2,03	0,097	1,49
H*Y	8	130,382	11,99	0,000	17,64
F*TA	4	2,174	0,40	0,808	0,29
F*Y	8	17,040	1,57	0,146	2,30
TA*Y	8	18,469	1,70	0,110	2,50
Hata	88	119,661			16,19
Toplam	134	739,316			100,00



Şekil 7.3 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.1.4 AISI H13 takım çeliği için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI H13 takım çeliğinin işlem tarama yönünün oyma derinliği analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.11'de listelenmiştir.

Çizelge 7.11'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.3'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 1. seviye (400mm/s), frekans için 1. seviye (20kHz), tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) ve işlem tarama yönü (0°) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen oyma derinliği değeri 115,8µm'dir.

Çizelge 7.11 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün oyma derinliğine ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	38,30*	35,77*	36,95*	35,92
2	35,07	35,66	35,60	36,16*
3	33,82	35,76	34,64	34,98
4				35,51
5				36,08

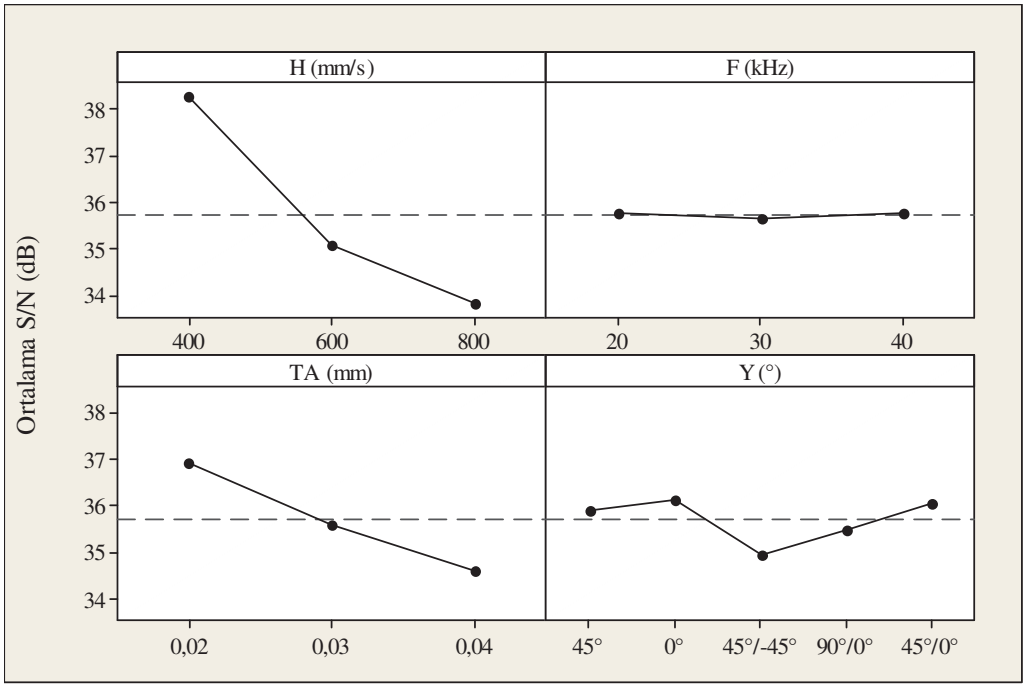
***** Optimum seviye

Çizelge 7.12, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, H*TA, H*F, F*TA ve F*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde frekansın etki oranının (0,04), hız ve tarama yönünün etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. Grafiksel gösterim ve S/N oranları incelendiğinde frekansın değerleri arasında belirgin değişimlerin olmadığı görülmektedir. Bu durum frekans için herhangi bir değerin seçilebileceğini göstermektedir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %59,19'dur. Bu durum en büyük oyma derinliği için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %59,19'luk bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama aralığıdır ve etki yüzdesi %14,98'dir. Tarama yönünün etki

yüzdesi %3,19'dur. Bu değer tarama yönünün diğer temel parametrelere göre daha az bir etkiliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.12 AISI H13 takım çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	481,278	234,85	0,000	59,19
Frekans (F)	2	0,332	0,16	0,851	0,04
Tarama aralığı (TA)	2	121,797	59,43	0,000	14,98
Tarama Yönü (°)	4	25,913	6,32	0,000	3,19
H*F	4	9,150	2,23	0,072	1,13
H*TA	4	2,958	0,72	0,579	0,36
H*Y	8	50,511	6,16	0,000	6,21
F*TA	4	2,882	0,70	0,592	0,35
F*Y	8	9,646	1,18	0,322	1,19
TA*Y	8	18,465	2,25	0,031	2,27
Hata	88	90,171			11,09
Toplam	134	813,101			100,00



Şekil 7.4 AISI H13 takım çeliği için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.2 AISI 316 Paslanmaz Çelik İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

AISI 316 paslanmaz çelik için yapılan oyma işleminde oyulmuş yüzeyin, yüzey pürüzlülüğünün ve oyma derinliğinin istatistiksel analizi aşağıdaki gibi dört ayrı başlıkla değerlendirilmiştir.

7.2.1 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI 316 paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğünün analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.13'de listelenmiştir. Çizelge 7.13'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.5'deki S/N oranın grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 1. seviye (18W), frekans için 1. seviye (20kHz), hız için 4. seviye (800mm/s) ve tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşul için ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 2,17µm'dir.

Çizelge 7.13 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	-13,66*	-16,73*	-23,91	-16,74
2	-17,25	-17,01	-17,50	-16,37*
3	-20,14	-17,31	-13,87	-17,95
4			-12,78*	

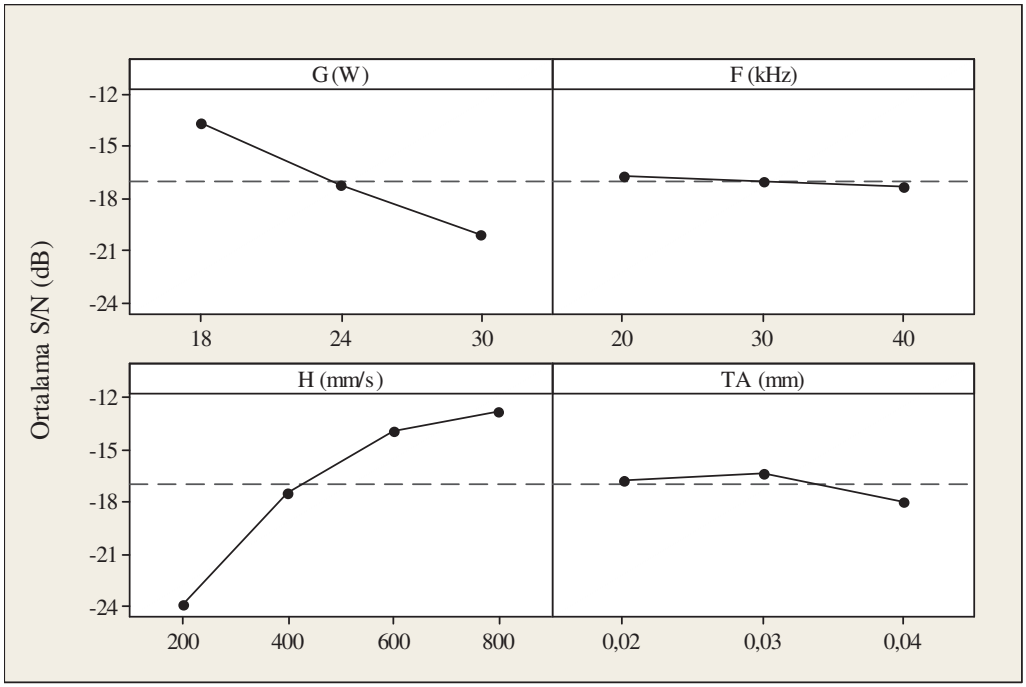
***** Optimum seviye

Çizelge 7.14, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, G*F, G*H ve F*TA hariç diğer tüm parametreler ve parametrelerin ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Çizelgede frekansa ait katkı yüzdesinin (%0,2) oldukça düşük olduğu görülmüştür ve Şekil 7.5'deki grafiksel gösterimde de frekansın yüzey pürüzlülüğünde neredeyse değişim yaratmadığı görülmektedir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımda tarama aralığının etki oranının (%1,60) çok düşük olduğu görülmüştür. En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %66,74'dür. Bu durum en

küçük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %66,74'lük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre güçtür ve etki yüzdesi %24,77'dir. Güç için p değeri 0,000 (<0,05)'dır ve bu sonuç gücün oldukça büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızı ve güç için elde edilen bu sonuç parametrelerin temel etkisindeki sonuçla benzerlik göstermektedir.

Çizelge 7.14 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	757,19	305,67	0,000	24,77
Frekans (F)	2	6,23	2,51	0,088	0,20
Hız (H)	2	2039,85	548,97	0,000	66,74
Tarama aralığı (TA)	2	49,02	19,79	0,000	1,60
G*F	4	2,72	0,55	0,700	0,09
G*H	6	12,22	1,64	0,148	0,40
G*TA	4	13,43	2,71	0,037	0,44
F*H	6	19,78	2,66	0,022	0,65
F*TA	4	1,72	0,35	0,846	0,06
H*TA	6	70,01	9,42	0,000	2,29
Hata	68	84,22			2,76
Toplam	107	3056,39			100,00



Şekil 7.5 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.2.2 AISI 316 paslanmaz çelik için temel parametrelerin oyma derinliğine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI 316 paslanmaz çeliğinin oyma derinliğinin analizinde en yüksek en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.15'de listelenmiştir.

Çizelge 7.15'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.6'daki S/N oranın grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 3. seviye (30W), frekans için 3. seviye (40kHz), hız için 1. seviye (200mm/s) ve tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Oyma derinliği için 40kHz'de optimum sonuç elde edilse bile hem S/N oranları hem de Şekil 7.6'daki grafiksel gösterimde frekans için herhangi bir değerin kullanılabileceği görülmektedir. Bu koşul için ölçülen oyma derinliği değeri 207,5µm'dir.

Çizelge 7.15 AISI 316 paslanmaz için oyma derinliğine ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	35,94	38,14	43,76*	39,37*
2	38,75	38,30	39,06	38,22
3	40,12*	38,38*	36,08	37,22
4			34,18	

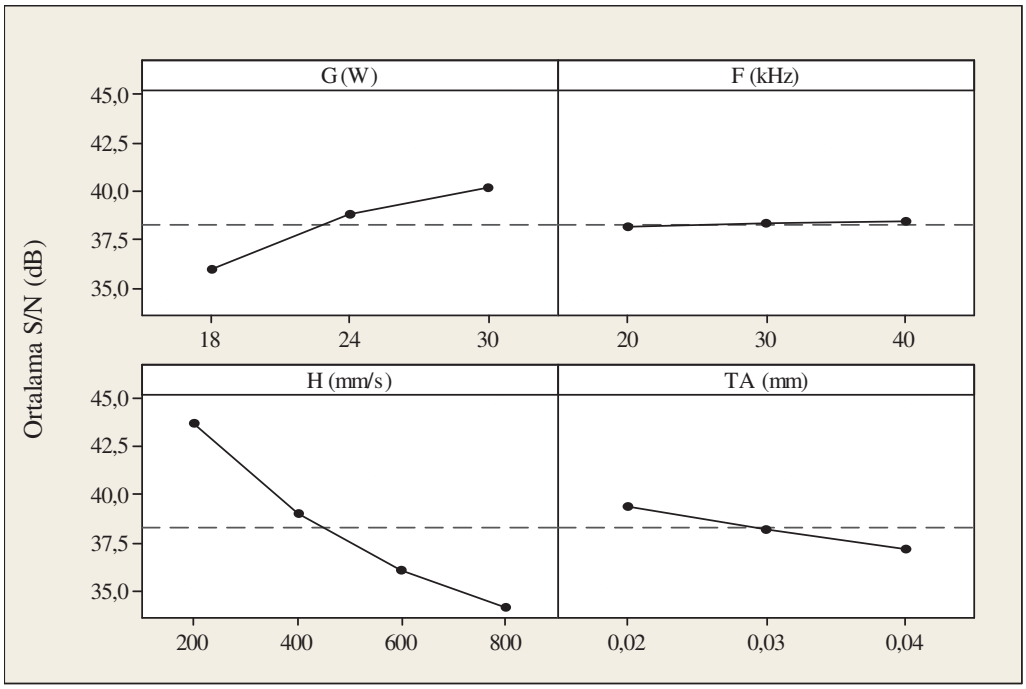
* Optimum seviye

Çizelge 7.16, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, G*TA, F*TA ve H*TA hariç diğer tüm parametreler ve parametrelerin ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Frekansın p değeri anlamlı görünmemektedir ve etki yüzdesi %0,06'dır ki bu değer oldukça düşüktür ve Şekil 7.7'deki grafiksel gösterimde de frekansın oyma derinliğinde neredeyse değişim yaratmadığı görülmektedir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %74,45'dir. Bu durum en büyük oyma derinliği için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %74,45'lik bir katkıya sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre güçtür ve etki yüzdesi %17,22'dir. Güç için p değeri de 0,000

(<0,05)'dır ve bu sonuç gücün oyma derinliği üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.16 AISI 316 paslanmaz çelik için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	326,34	307,74	0,000	17,22
Frekans (F)	2	1,08	1,02	0,366	0,06
Hız (H)	2	1410,76	886,89	0,000	74,45
Tarama aralığı (TA)	2	82,80	78,08	0,000	4,37
G*F	4	12,10	5,71	0,001	0,64
G*H	6	8,52	2,68	0,022	0,45
G*TA	4	0,72	0,34	0,849	0,04
F*H	6	14,86	4,67	0,000	0,78
F*TA	4	0,40	0,19	0,944	0,02
H*TA	6	1,28	0,40	0,874	0,07
Hata	68	36,06			1,90
Toplam	107	1894,93			100,00



Şekil 7.6 AISI 316 paslanmaz çelik için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.2.3 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI 316 paslanmaz çeliği için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.17'de listelenmiştir.

Çizelge 7.17'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.7'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 3. seviye (800mm/s), frekans için 3. seviye (40kHz), tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) ve işlem tarama yönü (90°/0°) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 3,51µm'dir. Tarama yönünün 0° ve 90°/0°'ye ait S/N oranlarının rakamsal değerleri ve grafiksel gösteriminde bu iki açının S/N oranın çok yakın değerde olduğu görülmektedir. Dolayısı ile tarama yönü için bu iki yönden biri seçilebilir. Tarama yönünün 0°'de ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 3,81µm'dir.

Çizelge 7.17 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	-16,92	-16,35	-16,08	-18,82
2	-16,38	-16,59	-15,21*	-14,93
3	-15,42*	-15,79*	-17,44	-17,54
4				-14,41*
5				-15,51

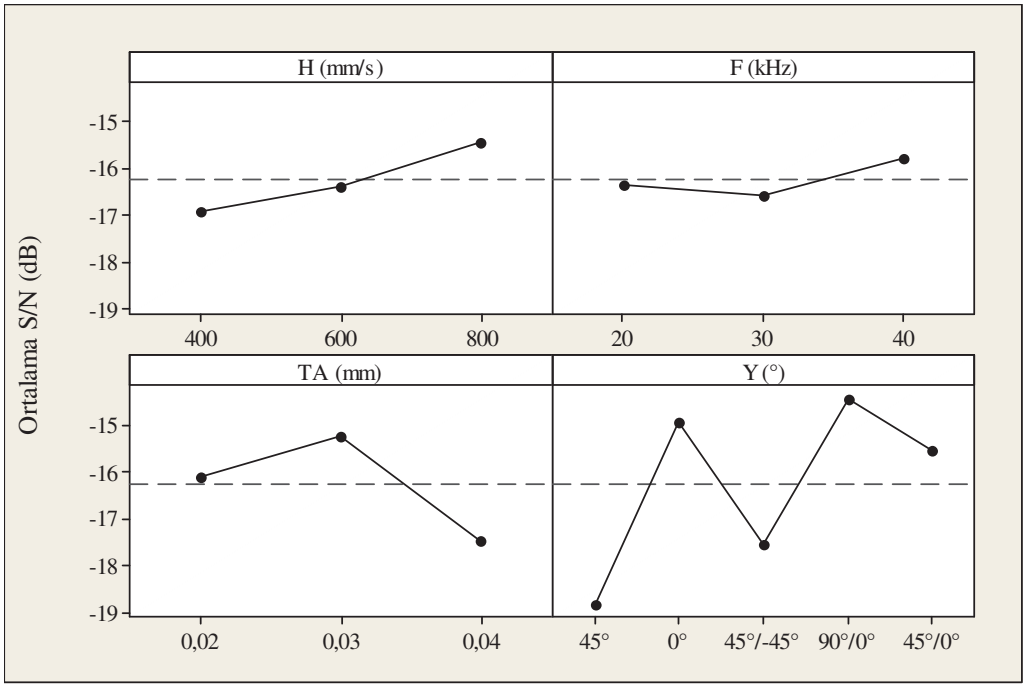
* Optimum seviye

Çizelge 7.18, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde H*F, H*TA, F*TA ve F*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde en düşük etkiye sahip parametre frekanstır (1,85). En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama yönü göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %45,37'dir. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin genel etkisi içinde tarama yönünün %45,37'lik bir etkiye sahip olduğunu

göstermektedir. Tarama yönünden sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama aralığıdır ve etki yüzdesi %13,63'dür.

Çizelge 7.18 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	51,688	20,68	0,000	6,22
Frekans (F)	2	15,340	6,14	0,003	1,85
Tarama aralığı (TA)	2	113,217	45,31	0,000	13,63
Tarama Yönü (°)	2	376,902	75,41	0,000	45,37
H*F	4	9,559	1,91	0,115	1,15
H*TA	6	6,681	1,34	0,263	0,80
H*Y	4	105,805	10,59	0,000	12,74
F*TA	6	2,533	0,51	0,731	0,30
F*Y	4	10,420	1,04	0,411	1,25
TA*Y	6	28,616	2,86	0,007	3,44
Hata	68	109,951			13,24
Toplam	107	830,710			100,00



Şekil 7.7 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.2.4 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AISI 316 paslanmaz çeliği için işlem tarama yönünün oyma derinliği analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.19'da listelenmiştir.

Çizelge 7.19'daki S/N oranlarına ve Şekil 7.8'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 1. seviye (400mm/s), frekans için 1. seviye (20kHz), tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) ve işlem tarama yönü (45° yada 0°) en büyük oyma derinliği için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen oyma derinliği değeri 102,73µm'dir.

Çizelge 7.19 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün oyma derinliği ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	38,41*	36,46*	37,28*	36,83*
2	35,78	36,33	36,22	36,81
3	34,94	36,33	35,63	35,93
4				36,06
5				36,25

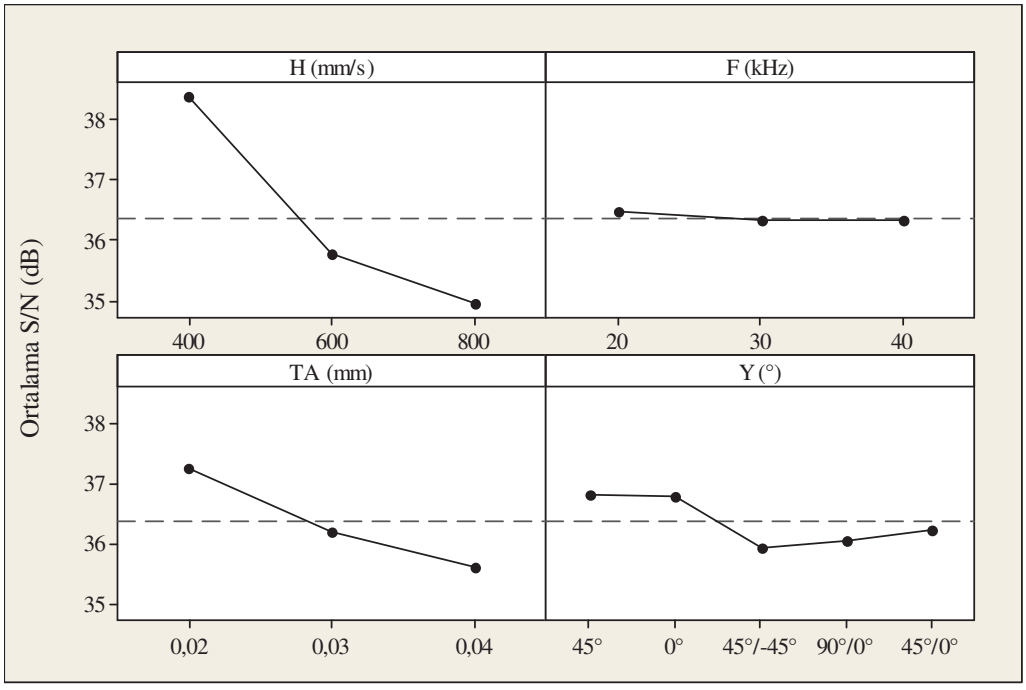
***** Optimum seviye

Çizelge 7.20, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, H*F, H*TA, F*TA, F*Y ve TA*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde frekansın etki oranının (0,12), hız ve tarama yönünün etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. Grafiksel gösterim ve S/N oranları incelendiğinde frekansın değerleri arasında belirgin değişimlerin olmadığı görülmektedir. Bu durum frekans için herhangi bir değerin seçilebileceğini göstermektedir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %66,44'dür. Bu durum en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %66,44'lük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama aralığıdır ve etki yüzdesi %14,31'dir. Tarama yönünün etki

yüzdesi %4,32'dir. Bu değer tarama yönünün diğer temel parametrelere göre daha az bir etkiliğe sahip olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.20 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	294,047	334,40	0,000	66,44
Frekans (F)	2	0,510	0,58	0,562	0,12
Tarama aralığı (TA)	2	63,354	72,05	0,000	14,31
Tarama Yönü (°)	2	19,128	10,88	0,000	4,32
H*F	4	4,174	2,37	0,058	0,94
H*TA	6	1,964	1,12	0,354	0,44
H*Y	4	9,008	2,56	0,015	2,04
F*TA	6	2,045	1,16	0,333	0,46
F*Y	4	5,528	1,57	0,145	1,25
TA*Y	6	4,125	1,17	0,325	0,93
Hata	68	38,691			8,74
Toplam	107	442,573			100,00



Şekil 7.8 AISI 316 paslanmaz çelik için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

AA 7075 alüminyum alaşımı için yapılan oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğünün ve oyma derinliğinin istatistiksel analizi aşağıdaki gibi dört ayrı başlıkla değerlendirilmiştir.

7.3.1 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AA 7075 alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğünün analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.21'de listelenmiştir. Çizelge 7.21'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.9'daki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 1. seviye (18W), frekans için 3. seviye (40kHz), hız için 4. seviye (800mm/s) ve tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşul için ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri 4,41µm olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü için frekansın 40kHz'deki değeri için optimum sonuç elde edilse bile Şekil 7.5'deki grafiksel gösterimde frekans için 20kHz ve 30kHz arasında herhangi bir değişimin olmadığı ve frekans için seçilen üç değerin S/N oranın yakın çıkması, en küçük yüzey pürüzlülüğü için herhangi bir değerin kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 7.21 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	-17,12*	-21,31	-24,34	-20,72
2	-21,00	-20,95	-21,10	-20,20*
3	-23,94	-19,81*	-19,71	-21,15
4			-17,61*	

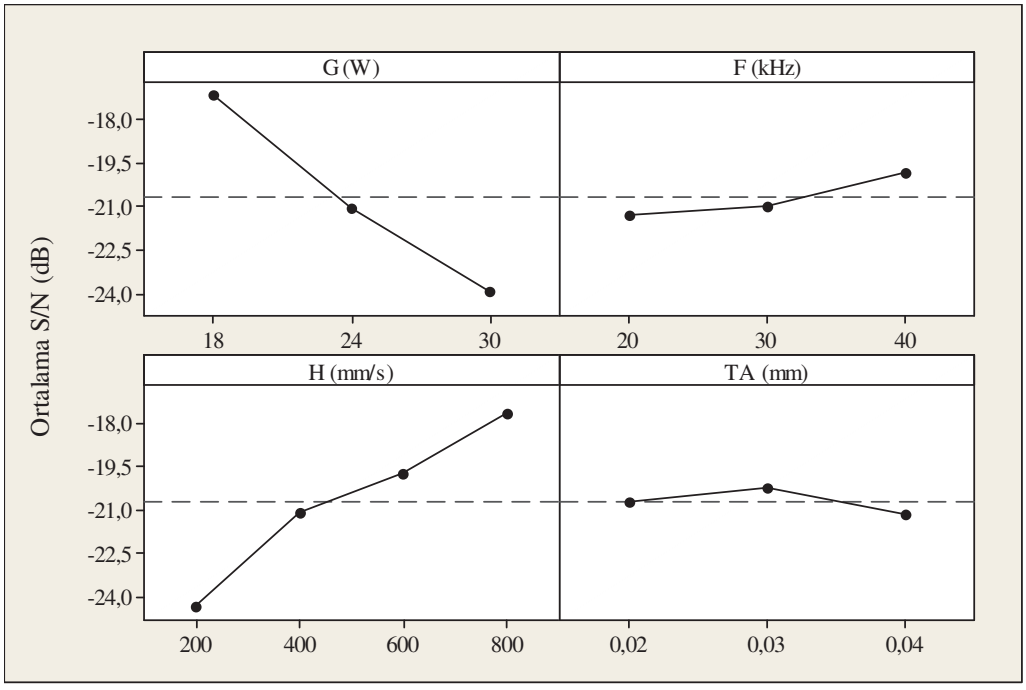
***** Optimum seviye

Çizelge 7.22, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgede, G*H hariç tüm parametreler ve parametrelerin etkileşimlerine ait p değerleri incelendiğinde hepsinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Tarama aralığının katkı yüzdesinin oldukça düşük (%0,89) olduğu görülmüştür ve bununla birlikte Şekil 7.9'daki

grafiksel gösterimine ve S/N oranlarına göre tarama aralığının 0,03mm ve 0,04mm'deki değerleri için ortalama S/N oranındaki değişimin çok düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.22 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	841,36	338,90	0,000	46,28
Frekans (F)	2	44,12	17,77	0,000	2,43
Hız (H)	2	646,42	173,58	0,000	35,56
Tarama aralığı (TA)	2	16,22	6,53	0,003	0,89
G*F	4	54,83	11,04	0,000	3,02
G*H	6	10,68	1,43	0,215	0,59
G*TA	4	40,20	8,10	0,000	2,21
F*H	6	20,17	2,71	0,020	1,11
F*TA	4	22,59	4,55	0,003	1,24
H*TA	6	36,96	4,96	0,000	2,03
Hata	68	84,41			4,64
Toplam	107	1817,96			100,00



Şekil 7.9 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi güç göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000

(<0,05) ve %46,28'dir. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin genel etkisi içinde gücün %46,28'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Güçten sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama hızıdır ve etki yüzdesi %35,56'dır. Tarama hızı için p değeri de 0,000 (<0,05)'dir ve bu sonuç tarama hızının oldukça büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

7.3.2 AA 7075 alüminyum alaşımı için temel parametrelerin oyma derinliğine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AA 7075 alüminyum alaşımının oyma derinliğinin analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.23'de listelenmiştir.

Çizelge 7.23'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.10'daki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 3. seviye (30W), frekans için 2. seviye (30kHz), hız için 1. seviye (200mm/s) ve tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Oyma derinliği için 30kHz'de optimum sonuç elde edilse bile Şekil 7.11'deki grafiksel gösterimde frekans için 20kHz ve 30kHz arasında büyük bir değişimin olmadığı ve frekans için seçilen üç değerin S/N oranın yakın çıkması, en büyük oyma derinliği değeri için herhangi bir değerin kullanılabileceğini göstermektedir. Bu koşul için oyma derinliği değeri 1,032mm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 7.23 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	-15,715	-11,471	-6,393*	-9,349*
2	-10,532	-11,434*	-11,029	-11,616
3	-8,673*	-12,015	-13,493	-13,956
4			-15,645	

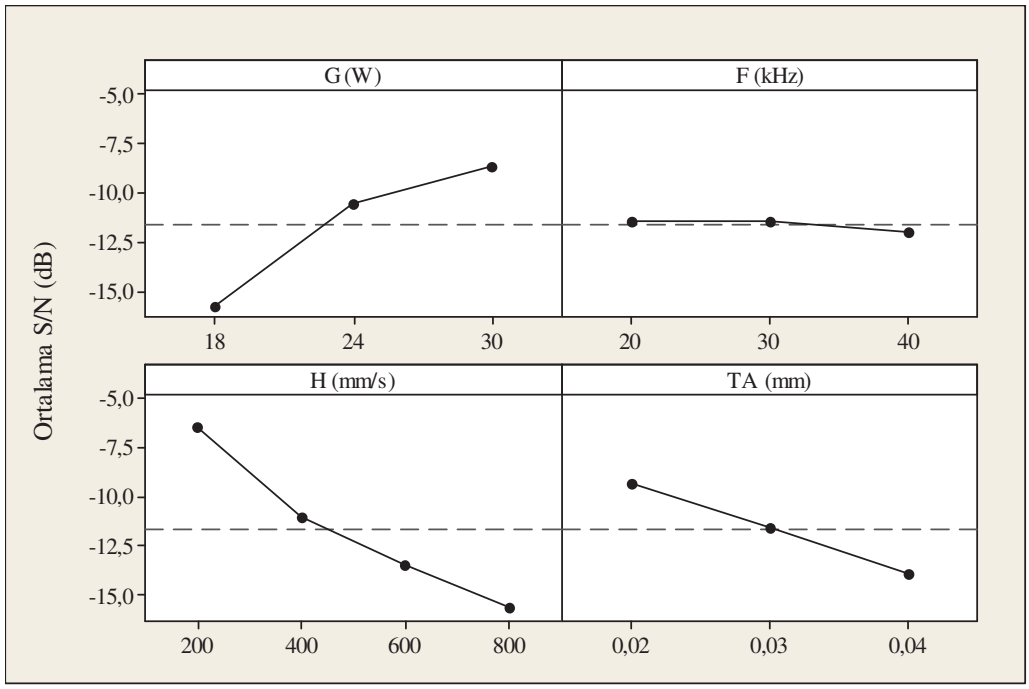
* Optimum seviye

Çizelge 7.24, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F*H F*TA ve H*TA hariç diğer tüm parametreler ve parametrelerin ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyinde anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Frekansın katkı yüzdesinin oldukça düşük (%0,27) olduğu görülmüştür ve Şekil 7.6'daki grafiksel

gösterimde de frekansın 20kHz ve 40kHz'deki değerleri arasında oyma derinliğinde neredeyse değişimin olmadığı görülmektedir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %44,94'dür. Bu durum en yüksek oyma derinliği için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %44,94'lük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre güçtür ve etki yüzdesi %33,69'dur.

Çizelge 7.24 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	2	958,87	404,02	0,000	33,69
Frekans (F)	2	7,61	3,21	0,047	0,27
Hız (H)	2	1279,18	359,32	0,000	44,94
Tarama aralığı (TA)	2	382,08	160,99	0,000	13,42
G*F	4	47,94	10,10	0,000	1,68
G*H	6	68,87	9,67	0,000	2,42
G*TA	4	12,01	2,53	0,048	0,42
F*H	6	4,83	0,68	0,667	0,17
F*TA	4	1,73	0,37	0,832	0,06
H*TA	6	2,45	0,34	0,911	0,09
Hata	68	80,69			2,83
Toplam	107	2846,28			100,00



Şekil 7.10 AA 7075 alüminyum alaşımı için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.3.3 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.25'de listelenmiştir.

Çizelge 7.25'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.11'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 3. seviye (800mm/s), frekans için 3. seviye (40kHz), tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) ve işlem tarama yönü (0°) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 3,51µm'dir. Tarama aralığının 0,02mm'deki ve 0,03mm'deki S/N oranlarının rakamsal değerleri ve grafiksel gösteriminde bu iki tarama aralığının S/N oranın çok yakın değerde olduğu görülmektedir. Dolayısı ile tarama aralığının bu iki değerinden biri seçilebilir. Tarama aralığının 0,02mm'de ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 6,33µm'dir.

Çizelge 7.25 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	-21,12	-20,94	-20,64	-20,98
2	-20,76	-20,65	-20,63*	-19,79*
3	-20,08*	-20,36*	-20,69	-20,75
4				-20,90
5				-20,84

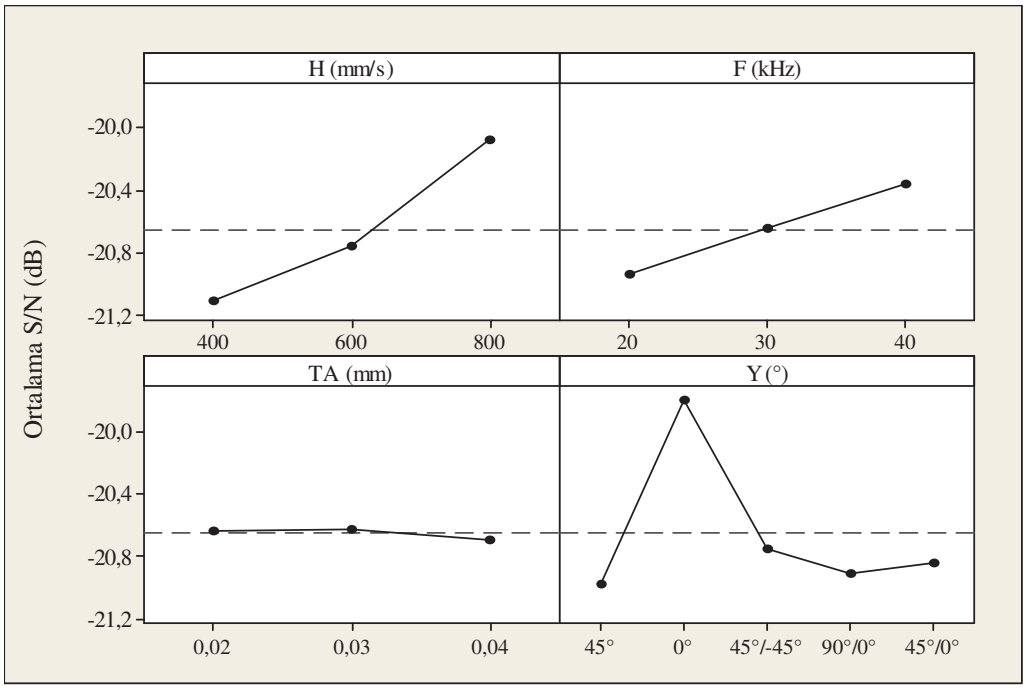
* Optimum seviye

Çizelge 7.26, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde TA, H*F, H*TA ve F*TA ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde en düşük etkiye sahip parametre tarama aralığıdır (%0,04). En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama yönü göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %10,17'dir. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü için

parametrelerin genel etkisi içinde tarama yönünün %10,17'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama yönünden sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama hızıdır ve etki yüzdesi %9,88'dir.

Çizelge 7.26 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	24,851	11,31	0,000	9,88
Frekans (F)	2	7,567	3,44	0,036	3,01
Tarama aralığı (TA)	2	0,102	0,05	0,955	0,04
Tarama Yönü (°)	4	25,567	5,82	0,000	10,17
H*F	4	6,561	1,49	0,211	2,61
H*TA	4	6,745	1,54	0,199	2,68
H*Y	8	34,885	3,97	0,000	13,88
F*TA	4	0,631	0,14	0,965	0,25
F*Y	8	24,574	2,80	0,008	9,77
TA*Y	8	23,287	2,65	0,012	9,26
Hata	88	96,654			38,44
Toplam	134	251,422			100,00



Şekil 7.11 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.3.4 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi

AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliği analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.27'de listelenmiştir.

Çizelge 7.27'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.12'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 1. seviye (400mm/s), frekans için 2. seviye (30kHz), tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) ve işlem tarama yönü (0°) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen oyma derinliği değeri 0,457mm'dir.

Çizelge 7.27 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün oyma derinliğine ait S/N oranları

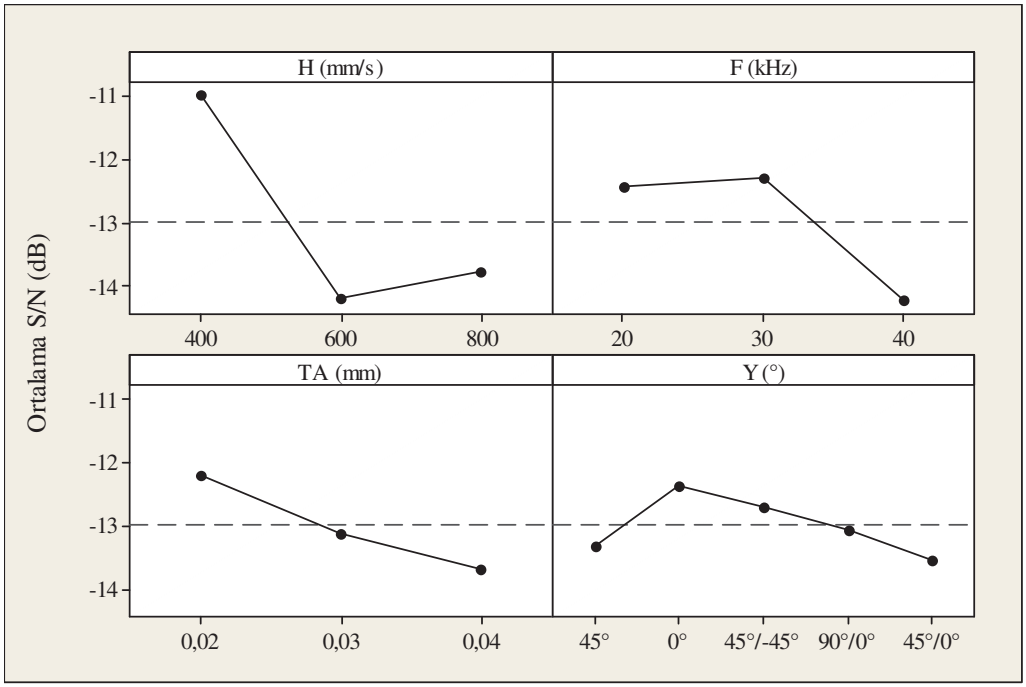
Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	-10,97*	-12,43	-12,18*	-13,31
2	-14,20	-12,29*	-13,11	-12,35*
3	-13,77	-14,23	-13,66	-12,68
4				-13,04
5				-13,53

***** Optimum seviye

Çizelge 7.28, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde TY, H*F, H*TA, H*Y, F*Y ve TA*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde tarama yönünün etki oranının (%2,21), hız, frekans ve tarama aralığının etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama hızı göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %24,81'dir. Bu durum en büyük yüksek oyma derinliği değeri için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %24,81'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama hızından sonraki en yüksek etkiye sahip parametre frekanstır ve etki yüzdesi %9,47'dir.

Çizelge 7.28 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	2	276,82	32,63	0,000	24,81
Frekans (F)	2	105,61	12,45	0,000	9,47
Tarama aralığı (TA)	2	50,43	5,94	0,004	4,52
Tarama Yönü (°)	4	24,63	1,45	0,224	2,21
H*F	4	38,57	2,27	0,068	3,46
H*TA	4	24,02	1,42	0,235	2,15
H*Y	8	51,18	1,51	0,166	4,59
F*TA	4	66,43	3,92	0,006	5,95
F*Y	8	37,17	1,10	0,374	3,33
TA*Y	8	67,59	1,99	0,057	6,06
Hata	88	373,31			33,46
Toplam	134	1115,75			100,00



Şekil 7.12 AA 7075 alüminyum alaşımı için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Tungsten Karbür için yapılan oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğünün ve oyma derinliğinin analizi aşağıdaki gibi dört ayrı başlıkla değerlendirilmiştir.

7.4.1 Tungsten Karbür için temel parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Tungsten Karbür için yüzey pürüzlülüğünün analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.29'da listelenmiştir.

Çizelge 7.29 Tungsten karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	-7,754*	-9,073*	-10,933	-9,554
2	-11,050	-9,732	-7,871*	-9,251*

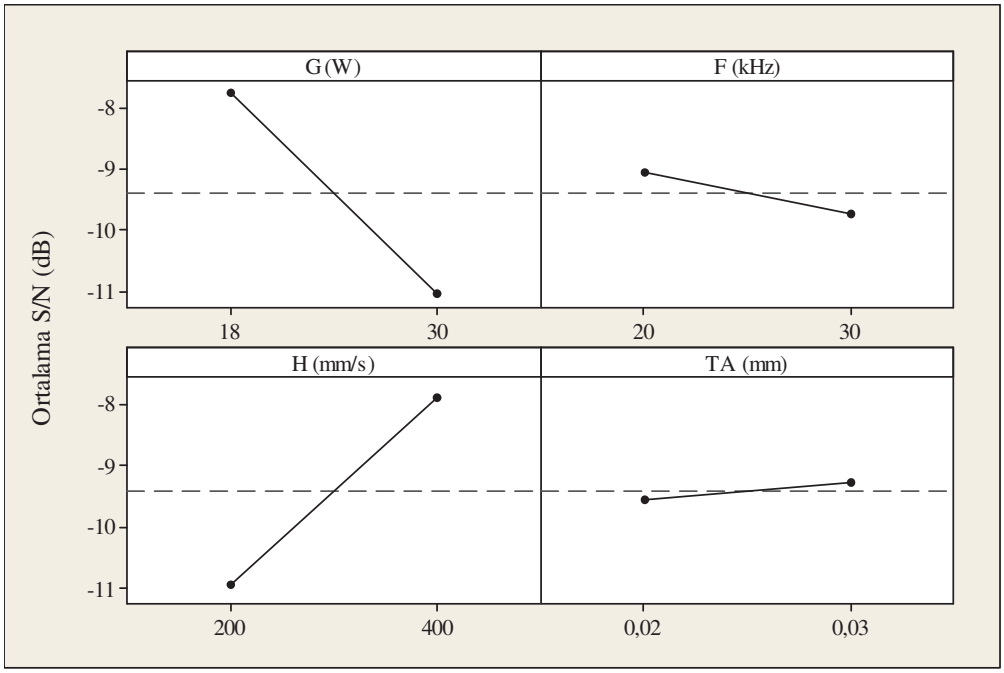
***** Optimum seviye

Çizelge 7.29'daki S/N oranlarına ve Şekil 7.13'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 1. seviye (18W), frekans için 1. seviye (20kHz), hız için 2. seviye (400mm/s) ve tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Yüzey pürüzlülüğü için tarama aralığının 0,03mm'deki değeri için optimum sonuç elde edilse bile Şekil 7.14'deki grafiksel gösterimde tarama aralığının 0,02mm ile 0,03mm değerleri arasında herhangi bir değişimin olmadığı ve ortalama S/N oranındaki değişimin çok düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.30, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgede tüm parametrelerin p değerlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olmadığı (>0,05) tespit edilmiştir. Ancak, güç (44,12%) ve tarama hızının (%38,08) etki düzeyi, frekansa (%1,76) ve tarama aralığı (%0,37) göre daha yüksektir. Şekil 7.13'deki grafiksel gösterimde de tarama aralığının iki değerine ait S/N oranları arasındaki değişim ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 7.30 Tungsten karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	1	21,7320	8,45	0,062	44,12
Frekans (F)	1	0,8688	0,34	0,602	1,76
Hız (H)	1	18,7558	7,30	0,074	38,08
Tarama aralığı (TA)	1	0,1835	0,07	0,807	0,37
Hata	3	7,7121			15,66
Toplam	7	49,2522			100



Şekil 7.13 Tungsten karbür için yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.4.2 Tungsten Karbür için temel parametrelerin oyma derinliğine ait deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Tungsten Karbür için oyma derinliği analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.31'de listelenmiştir.

Çizelge 7.31'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.14'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, güç için 2. seviye (30W), frekans için 1. seviye (20kHz), hız için 1. seviye (200mm/s) ve tarama aralığı için 1.

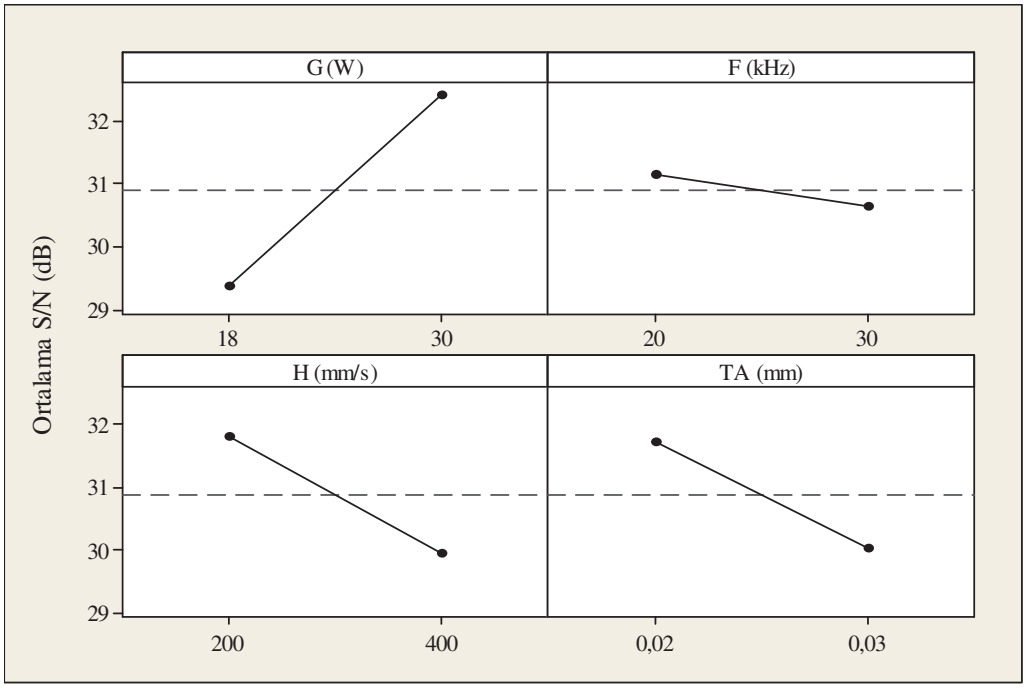
seviye (0,02mm) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir.

Çizelge 7.31 Tungsten karbür için oyma derinliğine ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	G	F	H	TA
1	29,36	31,15*	31,84*	31,73*
2	32,42*	30,63	29,94	30,05

* Optimum seviye

Çizelge 7.32, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgede güç dışında tüm parametrelerin p değerlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olmadığı (>0,05) tespit edilmiştir. Güç, oyma derinliği üzerinde % 51,25'lik bir etkiye sahiptir. Bununla birlikte, tarama hızı (%19,62) ve tarama aralığı (%15,41) neredeyse aynı etki oranına sahiptir. Oyma derinliği üzerinde en düşük etkiyi (%1,49) frekans göstermiştir.



Şekil 7.14 Tungsten karbür için oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

Çizelge 7.32 Tungsten Karbür için oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Güç (G)	1	18,7128	12,57	0,038	51,25
Frekans (F)	1	0,5461	0,37	0,587	1,49
Hız (H)	1	7,1643	4,81	0,116	19,62
Tarama aralığı (TA)	1	5,6259	3,78	0,147	15,41
Hata	3	4,4650			12,23
Toplam	7	36,5140			100

7.4.3 Tungsten Karbür için işlem yönüne ait yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğü analizinde en küçük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.33'de listelenmiştir.

Çizelge 7.33'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.15'deki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 2. seviye (400mm/s), frekans için 1. seviye (20kHz), tarama aralığı için 2. seviye (0,03mm) ve işlem tarama yönü (0°) en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen yüzey pürüzlülüğü değeri (Ra) 1,98µm'dir.

Çizelge 7.33 Tungsten Karbür için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları

Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	-17,25	-14,40*	-15,17	-17,54
2	-13,02*	-15,88	-15,10*	-10,44*
3				-15,49
4				-16,86
5				-15,35

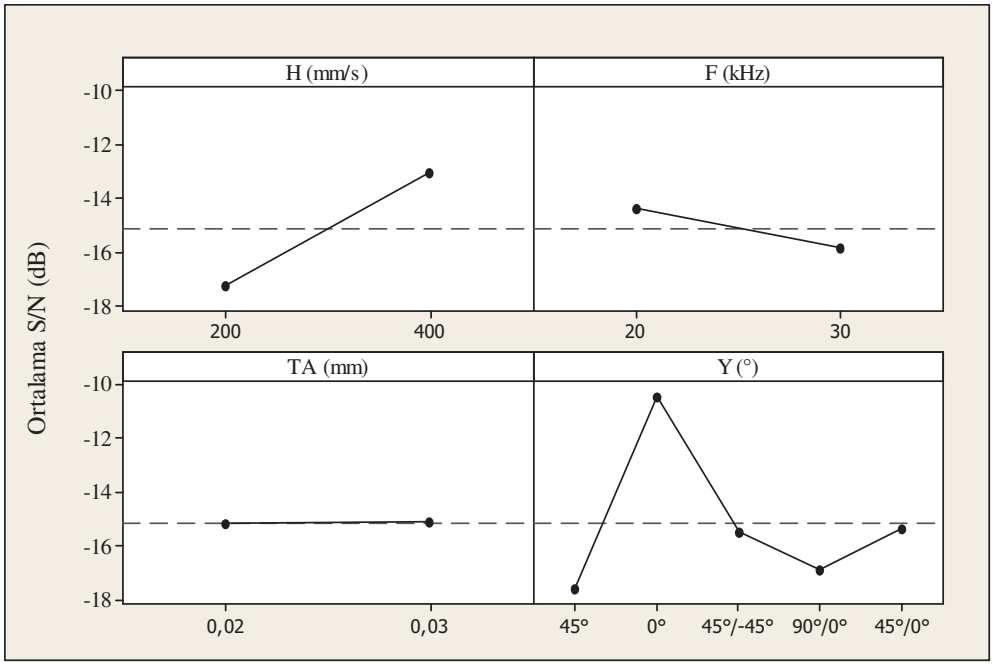
***** Optimum seviye

Çizelge 7.34, yüzey pürüzlülüğü için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde TA, H*TA, H*Y, F*TA, F*Y ve TA*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir.

Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde en düşük etkiye sahip parametre tarama aralığıdır (%0,01). En küçük yüzey pürüzlülüğü değeri için en yüksek etkiyi tarama yönü göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %54,48'dir. Bu durum en küçük yüzey pürüzlülüğü için parametrelerin genel etkisi içinde tarama yönünün %54,48'lik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama yönünden sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama hızıdır ve etki yüzdesi %32,91'dir.

Çizelge 7.34 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	1	179,438	84,71	0,000	32,91
Frekans (F)	1	21,910	10,34	0,005	4,018
Tarama aralığı (TA)	1	0,057	0,03	0,871	0,01
Tarama Yönü (°)	4	247,450	29,21	0,000	54,48
H*F	1	10,382	4,90	0,041	1,9
H*TA	1	0,402	0,19	0,669	0,07
H*Y	4	22,302	2,63	0,071	4,09
F*TA	1	2,238	1,06	0,318	0,41
F*Y	4	11,573	1,37	0,287	2,12
TA*Y	4	13,462	1,59	0,223	2,47
Hata	17	36,009			6,60
Toplam	39	545,223			100



Şekil 7.15 Tungsten Karbür için işlem yönünün yüzey pürüzlülüğüne ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

7.4.4 Tungsten Karbür için işlem yönüne ait oyma derinliği deney sonuçlarının istatistiksel analizi

Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliği analizinde en büyük en iyi performans karakteristiği kullanılmıştır ve buna göre parametrelerin her bir seviyesi için hesaplanan S/N oranları Çizelge 7.35'de listelenmiştir.

Çizelge 7.35'deki S/N oranlarına ve Şekil 7.16'daki S/N oranının grafiksel gösterimine göre, her bir parametre için en yüksek S/N oranı en büyük oyma derinliği değerini ifade etmektedir. Buna göre, hız için 1. seviye (200mm/s), frekans için 1. seviye (20kHz), tarama aralığı için 1. seviye (0,02mm) ve işlem tarama yönü (45°/0°) en büyük oyma derinliği değeri için parametrelerin seçilen optimum seviyeleridir. Bu koşulda ölçülen oyma derinliği değeri 100,687µm'dir.

Çizelge 7.35 Tungsten Karbür için oyma derinliğine ait S/N oranları

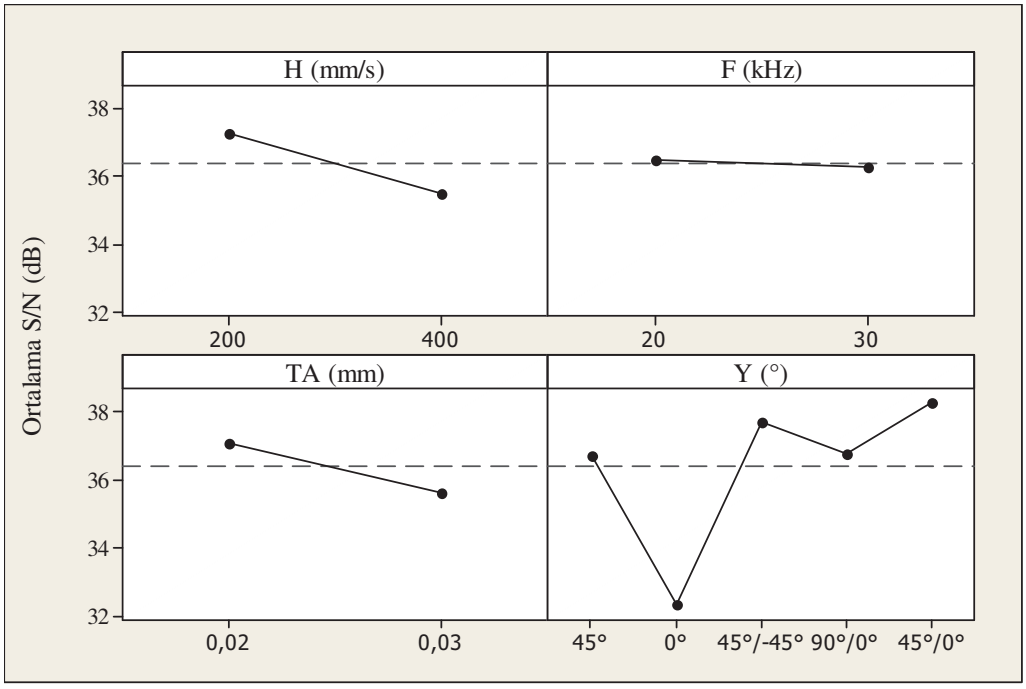
Seviyeler	Parametreler			
	H	F	TA	Y
1	37,28*	36,47*	37,13*	36,74
2	35,49	36,30	35,64	32,33
3				37,74
4				36,81
5				38,31*

* Optimum seviye

Çizelge 7.36, oyma derinliği için varyans analizi (ANOVA) sonuçlarını göstermektedir. Çizelgedeki p değerleri incelendiğinde F, H*F, H*TA, F*TA, F*Y ve TA*Y ikili etkileşimleri hariç tüm parametreler ve bunların ikili etkileşimlerinin %95 güven düzeyi için anlamlı olduğu (>0,05) tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yüzdesel dağılımlar incelendiğinde frekansın etki oranının (%0,11), hız ve tarama yönünün etki oranına göre çok düşük olduğu görülmüştür. Grafiksel gösterim ve S/N oranları incelendiğinde frekansın değerleri arasında belirgin değişimin olmadığı görülmektedir. Bu durum frekans için herhangi bir değerin seçilebileceğini göstermektedir. En büyük oyma derinliği değeri için en yüksek etkiyi tarama yönü göstermektedir ki bu parametrenin p değeri ve yüzde dağılımı sırasıyla 0,000 (<0,05) ve %62,63'dür. Bu durum en büyük oyma derinliği için parametrelerin genel etkisi içinde tarama hızının %62,63'lük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Tarama yönünden sonraki en yüksek etkiye sahip parametre tarama hızıdır ve etki yüzdesi %11,28'dir.

Çizelge 7.36 Tungsten Karbür için işlem tarama yönünün oyma derinliğine ait ANOVA sonuçları

Parametreler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	F değeri	p değeri	% dağılım
Hız (H)	1	32,164	38,72	0,000	11,28
Frekans (F)	1	0,314	0,38	0,547	0,11
Tarama aralığı (TA)	1	22,295	26,84	0,000	7,82
Tarama Yönü (°)	4	178,519	53,73	0,000	62,63
H*F	1	0,108	0,13	0,723	0,037
H*TA	1	3,338	4,02	0,061	1,17
H*Y	4	14,713	4,43	0,012	5,16
F*TA	1	1,259	1,52	0,235	0,44
F*Y	4	9,816	2,95	0,051	3,44
TA*Y	4	8,380	2,52	0,079	2,94
Hata	17	14,122			4,95
Toplam	39	285,028			100



Şekil 7.16 Tungsten Karbür için işlem yönünün oyma derinliğine ait ortalama S/N oranının grafiksel gösterimi

8. LAZER OYMA DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bir sistemden elde edilen cevap sistemi oluşturan faktörlerden etkilenir. Sistemden elde edilen cevap bağımlı değişkeni ifade ederken faktörler ise bağımsız değişkenleri ifade eder. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasında bir ilişkinin olup olmadığı, eğer varsa bu ilişkinin gücü bir regresyon modeli yardımıyla analiz edilebilir.

Akkurt (2002)'a göre regresyon, bağımlı değişken ile onu etkileyen bağımsız değişkenler (faktörler) arasında ortalama ilişki oluşturmaktır. Bu ilişki regresyon modeli olarak isimlendirilen matematiksel bir model ile karakterize edilir (Montgomery, 2001).

Bir adet bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişkenin bulunduğu regresyon modeli çok değişkenli regresyon modeli olarak bilinmektedir. Bununla birlikte, bir faktörün üç ve üçten büyük değerlerini içeren deneysel düzenler karesel yapıdadır ve lineer etkilerlerle birlikte karesel ve etkileşimsel etkileri de içine alan kuadratik modellerdir (Montgomery, 2001). Bu tip modeller ikinci dereceden regresyon modeller olarak adlandırılır.

İkinci dereceden regresyon modeli Denklem 7.1'deki gibidir (Montgomery, 2001).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i<j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j + \in \qquad (8.1)$$

Burada, k = bağımsız değişken sayısını,

y = Bağımlı değişkeni (cevap),

β = Model katsayılarını,

x_i = Bağımsız değişkenin *i.* seviyesi

$\in$ = Hata terimini

göstermektedir.

Regresyon modelinin oluşturulmasında faktörlerin boyutsuz kodlanmış değişkenlere dönüştürülmesi tercih edilmektedir. Kodlama için aşağıdaki formül kullanılmaktadır (Montgomery, 2001).

$$X^* = \frac{X_i - (X_{\max} + X_{\min})/2}{(X_{\max} - X_{\min})/2} \tag{8.2}$$

Burada, X^* = Faktörün *i.* seviyesindeki kodlu değerini

X_i = Faktörün *i.* seviyesindeki gerçek değerini

X_{max} = Faktörün en yüksek seviyedeki gerçek değerini

X_{min} = Faktörün en düşük seviyedeki gerçek değerini

göstermektedir.

Kurulan regresyon modelinin uygunluğunu ve güvenirliliği varyans analizi (ANOVA) ile belirlenir. ANOVA çizelgesindeki R^2 değeri, y'deki değişmelerin ne kadarı bağımsız değişkenlerdeki değişmeler tarafından açıklandığını ifade etmektedir. R^2 değeri 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır. Modeldeki değişken sayısının artması R^2 değerini etkilediğinden, R^2 yerine düzeltilmiş R_{adj}^2 kullanılması modelle ilgili daha doğru bir yorum yapılmasını sağlayacaktır. ANOVA çizelgesindeki p değeri, her bir faktörün %95 güven düzeyi için lineer, karesel ve etkileşim terimlerinin cevap üzerindeki istatistiksel önemliliklerini ifade eder. p değerinin 0,05'den küçük olması terimin %95 güven düzeyinde anlamlı, aksi durumda ise anlamsız olduğunu ifade eder.

Bu çalışmada, lazerle metal yüzeyinin oyulması işleminde proses parametrelerinin yüzey özelliklerine ve oyma derinliğine etkileri araştırılmış ve en iyi değeri veren koşullar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla sisteme etkisinin olduğu düşünülen dört temel parametre için 4^1x3^3 faktöriyel düzene göre toplam 108 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. 108 farklı kombinasyonda gerçekleştirilen deneyler sonucunda en küçük yüzey pürüzlülüğü ve en büyük oyma derinliği değerinin veren deney koşulu tespit edilmiştir. Hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için ikinci dereceden regresyon modeli ile tahmini bir model oluşturularak parametrelerle ilişkilendirilmiştir. Deney verilerinden 600mm/s'deki hıza ait 27 tane deney sonucu regresyon modelinde kullanılmayıp modelin analizinde test verisi olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Minitab Release 14 ve Design Expert 8.02 istatistik programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Çizelge 5.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelerden AISI H13 sıcak iş takım çeliği, AISI 316 paslanmaz çelik ve AA 7075 alaşımı için lazer

oyma işlem parametreleri ve parametrelerin değerleri ve Çizelge 5.3'de ise Tungsten Karbür için lazer oyma işlemin temel parametreleri ve parametrelerin değerleri listelenmiştir.

8.1 AISI H13 Sıcak İş Takım Çeliği İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi

Lazerle oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne (YP, Ra) ve oyulmuş alanın derinliğinin ikinci dereceden kuatratik denklemi Minitap R15 istatistik programı kullanılarak parametrelerin her bir seviyesine atanan kodlara göre yapılan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi ile hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için oluşturulan tahmini matematiksel modellere ait katsayılar Çizelge 8.1'de listelenmiştir.

Çizelge 8.1'deki katsayılar hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için Denklem 8.1'de yerine konulduğunda kurulan tahmini matematiksel modeller aşağıda sırasıyla verilmiştir. Buna göre Denklem 8.3, yüzey pürüzlülüğüne ait tahmini modeli ve Denklem 3.4 ise oyma derinliğine ait tahmini modeli ifade etmektedir.

Denklem 8.3

$$YP = 4{,}3044 + 3{,}0290G + 0{,}4006F - 5{,}5963H - 0{,}4786TA + 0{,}0643G*G - 0{,}5702F*F + 5{,}0174H*H + 1{,}1765TA*TA - 0{,}9625G*F - 2{,}7439G*H - 0{,}2911G*TA + 0{,}03F*H - 0{,}0989F*TA + 0{,}4208H*TA$$

Denklem 8.4

$$D = 89{,}1265 + 20{,}9043G + 2{,}8048F - 39{,}9052H - 14{,}9925TA + 20{,}4804G*G - 5{,}4459F*F + 12{,}2972H*H + 6{,}3263TA*TA - 8{,}0419G*F - 1{,}4515G*H - 2{,}6042G*TA + 2{,}3803F*H - 0{,}9844F*TA + 3{,}5612H*TA$$

Çizelge 8.1 AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları

Terim	Sembol	Yüzey pürüzlülüğü (YP, Ra)	Oyma Derinliği (D)
		Katsayı (Kodlu)	Katsayı (Kodlu)
Sabit	β_0	4,3044	89,1265
G	β_1	3,0290	20,9043
F	β_2	0,4006	2,8048
H	β_3	-5,5963	-39,9052
TA	β_4	-0,4786	-14,9925
G*G	β_{11}	0,0643	-20,4804
F*F	β_{22}	-0,5702	-5,4459
H*H	β_{33}	5,0174	12,2972
TA*TA	β_{44}	1,1765	6,3263
G*F	β_{12}	-0,9625	-8,0419
G*H	β_{13}	-2,7439	-1,4515
G*TA	β_{14}	-0,2911	-2,6042
F*H	β_{23}	0,0300	2,3803
F*TA	β_{24}	-0,0989	0,9844
H*TA	β_{34}	0,4208	3,5612

Yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için oluşturulan matematiksel modellerin geçerliliğini test etmek için parametrelerin hem modelde kullanılan değerleri hem de modelde kullanılmayan (600mm/s'deki) değerleri kullanılmıştır. Tahmini modelden elde edilen değerler ile gerçek uygulamadan ölçülen değerler Çizelge 8.2'de listelenmiştir.

Çizelge 8.2'deki AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Değerler arasındaki en küçük değişim %2 ile 8 nolu deney koşulunda elde edilmiştir. Bu deney koşulu modelde kullanılmayan bir koşuldur ve ölçülen değer ile modelden elde edilen değerler arasındaki farkın küçük çıkması modelin geçerliliğinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,927 ve 0,912'dir. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin %91,2'nin bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.2'deki AISI H13 takım çeliğine ait oyma derinliği için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulamadan ölçülen değerler incelendiğinde 2 ve 5 nolu deney koşulu hariç matematiksel model ile gerçek ölçüm sonuçları arasında çok büyük değişimler tespit edilememiştir. Bazı sonuçlar arasındaki değişim neredeyse %1'den küçük çıkmıştır. Modelin R^2 ve R_{adj}^2

değerleri sırasıyla 0,824 ve 0,787'dur. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri oyma derinliğindeki değişimlerin %78,7'nun bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.2 AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamadan elde edilen sonuçlar

Deney no	Deney koşulları	Tahmini Değer (YP)	Ölçülen Değer (YP)	Tahmini Değer (D)	Ölçülen Değer (D)
1	*G=100, H=800, F=40, TA=0,04*	3,70	4,56	45,46	54,64
2	*G=100, H=200, F=30, TA=0,02*	23,12	23,78	170,69	150,85
3	*G=80, H=400, F=20, TA=0,04*	6,42	5,92	85,499	85,81
4	*G=100, H=600, F=20, TA=0,02*	6,86	7,44	99,85	101,93
5	*G=80, H=800, F=40, TA=0,04*	4,61	3,48	57,137	28,96
6	*G=100, H=400, F=30, TA=0,02*	12,82	10,44	129,81	144,92
7	*G=100, H=200, F=40, TA=0,04*	19,480	20,33	116,29	121,5
8	*G=80, H=600, F=40, TA=0,02*	4,45	4,54	94,492	94,02
9	*G=100, H=600, F=40, TA=0,04*	4,50	5,13	58,14	67,64
10	*G=100, H=600, F=20, TA=0,03*	5,16	5,49	76,13	85,98
11	*G=60, H=600, F=40, TA=0,02*	3,072	3,63	59,03	55,73
12	*G=100, H=600 F=20, TA=0,04*	5,80	5,61	65,06	76,61
13	*G=80, H=600, F=30, TA=0,04*	3,83	4,58	69,71	53,27
14	*G=100, H=400, F=40, TA=0,03*	8,43	9,59	93,22	110
15	*G=100, H=600, F=30, TA=0,02*	6,98	6,44	99,86	97,1

Çizelge 8.3, AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA tablosunu göstermektedir. ANOVA tablosunda parametrelerin doğrusal, karesel ve etkileşim terimleri ve bunlara ait karelerin toplamı, F ve p değerleri verilmiştir. Tablodaki p değerinin 0,05'den küçük olması terimin anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna göre, yüzey pürüzlülüğü için tüm katsayılar %95 güven düzeyinde anlamlı olmasına karşın oyma derinliği için etkileşimlerin katsayısı anlamlı çıkmamıştır.

Çizelge 8.3 AISI H13 takım çeliğine ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları

Terim	Df	Yüzey Pürüzlülüğü(YP, Ra)			Oyma Derinliği (D)		
		SS	F	p	SS	F	p
Regresyon	14	2791,35	60,11	0,000	135365	22,09	0,000
Lineer	4	2090,75	165,71	0,000	121116	69,42	0,000
Karesel	4	376,11	28,35	0,000	10878	6,21	0,000
Etkileşimler	6	324,49	16,30	0,000	3371	1,28	0,277
Artık hata	66	218,92			28882		
Toplam	80	3010,27			164248		

8.2 AISI 316 Paslanmaz Çeliği İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi

Lazerle oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne (YP, Ra) ve oyulmuş alanın derinliğinin (D) ikinci dereceden kuatratik denklemi Minitap R15 istatistik programı kullanılarak parametrelerin her bir seviyesine atanan kodlara göre yapılan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi ile hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için oluşturulan tahmini matematiksel modellere ait katsayılar Çizelge 8.4'de listelenmiştir. Çizelge 8.4'deki katsayılar hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için Denklem 8.1'de yerine konulduğunda kurulan tahmini matematiksel modeller aşağıda sırasıyla verilmiştir. Buna göre Denklem 8.5, yüzey pürüzlülüğüne ait tahmini modeli ve Denklem 8.6 ise oyma derinliğine ait tahmini modeli ifade etmektedir.

Denklem 8.5

$$YP = 3,798 + 3,494G + 0,193F - 6,111H - 0,066TA + 0,428G*G + 0,416F*F + 5,399H*H + 1,444TA*TA + 0,019G*F - 2,469G*H - 0,355G*TA + 0,219F*H - 0,276F*TA + 1,0717H*TA$$

Denklem 8.6

$$D = 77,998 + 19,687G + 2,061F - 52,632H - 12,980TA - 11,956G*G - 1,457F*F + 35,263H*H + 1,999TA*TA + 6,358G*F - 5,662G*H - 1,037G*TA - 4,634F*H - 0,652F*TA + 6,852H*TA$$

Çizelge 8.4 AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları

Terim	Sembol	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)	Oyma Derinliği (D)
		Katsayı (Kodlu)	Katsayı (Kodlu)
Sabit	β_0	3,798	77,998
G	β_1	3,494	19,687
F	β_2	0,193	2,061
H	β_3	-6,111	-52,632
TA	β_4	-0,066	-12,980
G*G	β_{11}	0,428	-11,956
F*F	β_{22}	0,416	-1,457
H*H	β_{33}	5,399	35,263
TA*TA	β_{44}	1,444	1,999
G*F	β_{12}	0,019	6,358
G*H	β_{13}	-2,469	-5,662
G*TA	β_{14}	-0,355	-1,037
F*H	β_{23}	0,219	-4,634
F*TA	β_{24}	0,276	-0,652
H*TA	β_{34}	1,0717	6,852

Çizelge 8.5'deki AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Değerler arasındaki en küçük değişim %0,2 ile 15 nolu deney koşulunda elde edilmiştir. Bu deney koşulu modelde kullanılan bir koşuldur ve ölçülen değer ile modelden elde edilen değerler arasındaki farkın küçük çıkması modellin geçerliliğinin de yüksek olduğunu göstermektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,941 ve 0,929'dur. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin %92,9'nun bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.5'deki AISI 316 paslanmaz çeliğine ait oyma derinliği için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları incelendiğinde 2 ve 5 nolu deney koşulu hariç matematiksel model ile gerçek ölçüm sonuçları arasında çok büyük değişimler tespit edilememiştir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,941 ve 0,928'dir. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri oyma derinliğindeki değişimlerin %92,8'nin bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.5 AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamadan elde edilen sonuçlar

Deney no	Deney koşulları	Tahmini Değer (YP)	Ölçülen Değer (YP)	Tahmini Değer (D)	Ölçülen Değer (D)
1	*G=100, H=800, F=40, TA=0,04*	7,757	7,548	59,208	64,08
2	*G=100, H=200, F=30, TA=0,02*	24,63	23,43	202,154	187,5
3	*G=80, H=400, F=20, TA=0,04*	7,47	7,97	81,788	82,92
4	*G=100, H=600, F=20, TA=0,02*	7,37	6,89	74,966	83,05
5	*G=80, H=800, F=40, TA=0,04*	6,64	5,68	51,818	42,44
6	*G=100, H=400, F=30, TA=0,02*	13,402	11,88	127,37	129,03
7	*G=100, H=200, F=40, TA=0,04*	22,335	23,062	171,36	165
8	*G=80, H=600, F=40, TA=0,02*	3,92	4,67	76,778	72,33
9	*G=100, H=600, F=40, TA=0,04*	7,81	7,44	65,248	76,16
10	*G=100, H=600, F=20, TA=0,03*	5,59	6,04	61,885	77,01
11	*G=60, H=600, F=40, TA=0,02*	3,15	3,56	39,628	43,04
12	*G=60, H=600, F=20, TA=0,04*	2,102	3,21	31,99	37,33
13	*G=80, H=600, F=30, TA=0,04*	4,1	5,35	55,675	58,11
14	*G=100, H=600, F=30, TA=0,02*	6,97	8,23	83,949	86,297
15	*G=100, H=400, F=40, TA=0,04*	12,676	12,712	102,628	107,68

Çizelge 8.6 AISI 316 paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları

Terim	Df	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)			Oyma Derinliği (D)		
		SS	F	p	SS	F	p
Regresyon	14	3247,66	75,80	0,000	193804	74,72	0,000
Lineer	4	2524,22	217,82	0,000	168806	241,98	0,000
Karesel	4	443,80	36,26	0,000	19738	26,64	0,000
Etkileşimler	6	279,64	46,606	0,000	5261	4,73	0,000
Artık hata	66	201,98			12227		
Toplam	80	3449,64			206031		

Çizelge 8.6, AISI 316 paslanmaz çeliğe ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA tablosunu göstermektedir. ANOVA tablosunda parametrelerin doğrusal, karesel ve etkileşim terimleri ve bunlara ait karelerin toplamı, F ve p değerleri verilmiştir. Tablodaki p değerinin 0,05'den küçük olması

terimin anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna göre, hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için tüm katsayılar %95 güven düzeyinde anlamlıdır.

8.3 AA 7075 Alüminyum Alaşımı İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi

Lazerle oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne (YP, Ra) ve oyulmuş alanın derinliğinin (D) ikinci dereceden kuatratik denklemi Minitap R15 istatistik programı kullanılarak parametrelerin her bir seviyesine atanan kodlara göre yapılan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi ile hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için oluşturulan tahmini matematiksel modellere ait katsayılar Çizelge 8.7'de listelenmiştir.

Çizelge 8.7'deki katsayılar hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için Denklem 8.1'de yerine konulduğunda kurulan tahmini matematiksel modeller aşağıda sırasıyla verilmiştir. Buna göre Denklem 8.7, yüzey pürüzlülüğü ait tahmini modeli ve Denklem 8.8 ise oyma derinliğine ait tahmini modeli ifade etmektedir.

Denklem 8.7

$$YP = 10{,}008 + 4{,}5416G - 1{,}2982F - 4{,}7644H - 0{,}5244TA + 0{,}2652G*G - 1{,}0631F*F + 2{,}7973H*H + 1{,}0835TA*TA - 0{,}8886G*F - 1{,}1287G*H - 1{,}5192G*TA + 1{,}1978F*H + 1{,}0339F*TA + 1{,}4091H*TA$$

Denklem 8.8

$$D = 0{,}2426 + 0{,}1318G - 0{,}006F - 0{,}1858H - 0{,}0795TA - 0{,}0321G*G - 0{,}00143F*F + 0{,}1326H*H + 0{,}01363TA*TA + 0{,}03661G*F - 0{,}10742G*H - 0{,}02689G*TA + 0{,}00957F*H + 0{,}014528F*TA + 0{,}036738H*TA$$

Çizelge 8.7 AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları

Terim	Sembol	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)	Oyma Derinliği (D)
		Katsayı (Kodlu)	Katsayı (Kodlu)
Sabit	β_0	10,008	0,2426
G	β_1	4,5416	0,1318
F	β_2	-1,2982	-0,006
H	β_3	-4,7644	-0,1858
TA	β_4	-0,5244	-0,0795
G*G	β_{11}	0,2652	-0,0321
F*F	β_{22}	-1,0631	-0,00143
H*H	β_{33}	2,7973	0,1326
TA*TA	β_{44}	1,0835	0,01363
G*F	β_{12}	-0,8886	0,03661
G*H	β_{13}	-1,1287	-0,10742
G*TA	β_{14}	-1,5192	-0,02689
F*H	β_{23}	1,1978	0,00957
F*TA	β_{24}	1,0339	0,014528
H*TA	β_{34}	1,4091	0,036738

Çizelge 8.8'de, AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en fazla %30'luk bir değişim tespit edilmiştir ki bu değer modelde kullanılmayan 600mm/s'deki hızda ölçülmüştür. Bu değerin dışında diğer değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,875 ve 0,849'dur. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin %84,9'nun bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.8'de, AA 7075 alüminyum alaşımına ait oyma derinliği için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en fazla %42'lik bir değişim tespit edilmiştir ki bu değer modelde kullanılmayan 600mm/s'deki hızda ölçülmüştür. Bu değerin dışında diğer değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,927 ve 0,911'dir. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri oyma derinliğindeki değişimlerin %91,1'nin bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.8 AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamadan elde edilen sonuçlar

Deney no	Deney koşulları	Tahmini Değer (YP)	Ölçülen Değer (YP)	Tahmini Değer (D,mm)	Ölçülen Değer (D,mm)
1	*G=100, H=800, F=40, TA=0,04*	11,149	12,64	0,179	0,163
2	*G=100, H=200, F=30, TA=0,02*	28,041	30,22	0,925	1,032
3	*G=80, H=400, F=20, TA=0,04*	11,596	12,55	0,234	0,256
4	*G=100, H=600, F=20, TA=0,02*	17,577	14,88	0,346	0,371
5	*G=80, H=800, F=40, TA=0,04*	9,88	8,07	0,176	0,122
6	*G=100, H=400, F=30, TA=0,02*	20,686	24,21	0,587	0,488
7	*G=100, H=200, F=40, TA=0,04*	17,722	16,5	0,673	0,81
8	*G=80, H=600, F=40, TA=0,02*	6,873	7,6	0,257	0,276
9	*G=100, H=600, F=40, TA=0,04*	10,854	12,34	0,226	0,236
10	*G=100, H=600, F=20, TA=0,03*	13,885	13,79	0,224	0,230
11	*G=80, H=600, F=20, TA=0,03*	8,57	11,17	0,197	0,204
12	*G=60, H=600, F=20, TA=0,04*	5,29	6,1	0,064	0,091
13	*G=80, H=600, F=30, TA=0,04*	9,759	10,2	0,142	0,162
14	*G=100, H=600, F=30, TA=0,02*	15,818	17,26	0,367	0,364
15	*G=100, H=400, F=40, TA=0,04*	13,044	15,26	0,390	0,370

Çizelge 8.9 AA 7075 alüminyum alaşımı için yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları

Terim	Df	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)			Oyma Derinliği (D)		
		SS	F	p	SS	F	p
Regresyon	14	2920,16	33,14	0,000	4,00541	59,59	0,000
Lineer	4	2444,86	96,30	0,000	3,17583	162,66	0,000
Karesel	4	150,06	5,96	0,000	0,26312	13,70	0,000
Etkileşimler	6	325,24	8,61		0,56646	19,66	
Artık hata	66	415,36			0,31687		
Toplam	80	3335,51			4,32229		

Çizelge 8.9, AA 7075 alüminyum alaşımına ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA tablosunu göstermektedir. ANOVA tablosunda parametrelerin doğrusal, karesel ve etkileşim terimleri ve bunlara ait karelerin

toplamı, F ve p değerleri verilmiştir. Tablodaki p değerinin 0,05'den küçük olması terimin anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna göre, hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için tüm katsayılar %95 güven düzeyinde anlamlıdır.

8.4 Tungsten Karbür İçin Deney Sonuçlarının Matematiksel Modellenmesi

Lazerle oyma işleminde oyulmuş yüzeyin yüzey pürüzlülüğüne (YP, Ra) ve oyulmuş alanın derinliğinin (D) ikinci dereceden kuatratik denklemi Minitap R15 istatistik programı kullanılarak parametrelerin her bir seviyesine atanan kodlara göre yapılan regresyon analizi ile belirlenmiştir. Regresyon analizi ile hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için oluşturulan tahmini matematiksel modellere ait katsayılar Çizelge 8.10'da listelenmiştir.

Çizelge 8.10 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için her bir terim için regresyon katsayıları

Terim	Sembol	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)	Oyma Derinliği (D)
		Katsayı (Kodlu)	Katsayı (Kodlu)
Sabit	β_0	3,0650	33,0475
G	β_1	0,5237	5,0513
F	β_2	0,0863	2,5938
H	β_3	-0,5713	-4,7138
TA	β_4	0,0150	-0,9163
G*F	β_{12}	-0,1150	2,5150
G*H	β_{13}	0,0725	1,2175
G*TA	β_{14}	-0,1163	-0,0625
F*H	β_{23}	-0,1850	3,9750
F*TA	β_{24}	-0,04125	-2,6500
H*TA	β_{34}	-0,036250	2,5700

Çizelge 8.10'daki katsayılar hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için Denklem 8.1'de yerine konulduğunda kurulan tahmini matematiksel modeller aşağıda sırasıyla verilmiştir. Buna göre Denklem 8.9, yüzey pürüzlülüğü ait tahmini modeli ve Denklem 8.10 ise oyma derinliğine ait tahmini modeli ifade etmektedir.

Denklem 8.9

$$YP = 10,008 + 4,5416G - 1,2982F - 4,7644H - 0,5244TA + 0,2652G*G - 1,0631F*F + 2,7973H*H + 1,0835TA*TA - 0,8886G*F - 1,1287G*H - 1,5192G*TA + 1,1978F*H + 1,0339F*TA + 1,4091H*TA$$

Denklem 8.10

$$D = 0,2426 + 0,1318G - 0,006F - 0,1858H - 0,0795TA - 0,0321G*G - 0,00143F*F + 0,1326H*H + 0,01363TA*TA + 0,03661G*F - 0,10742G*H - 0,02689G*TA + 0,00957F*H + 0,014528F*TA + 0,036738H*TA$$

Çizelge 8.11'de, Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü için tahmini modelden elde edilen değerler ve model oluşturulmasında kullanılan gerçek uygulama sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde modelden elde edilen değerler ile bu değerlere karşılık gelen gerçek uygulamadan ölçülen değerlerin çok yakın olduğu görülmektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,981 ve 0,944'dür. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin %94,4'nün bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.11'de, Tungsten Karbüre ait oyma derinliği için tahmini modelden elde edilen değerler ve gerçek uygulama sonuçları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde 11 nolu kombinasyondan modelden elde edilen değer ile gerçek uygulama arasında 2 kat fazlalık tespit edilmiştir. Bu değerin dışında diğer değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Modelin R^2 ve R_{adj}^2 değerleri sırasıyla 0,515 ve 0,339'dür. Bu değerlerden R_{adj}^2 değeri oyma değerindeki değişimlerin %33,9'nün bağımsız değişkenlerle açıklandığını göstermektedir.

Çizelge 8.12, Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA tablosunu göstermektedir. ANOVA tablosunda parametrelerin doğrusal ve etkileşimlerin terimleri ve bunlara ait karelerin toplamı, F ve P değerleri verilmiştir. Tablodaki P değerinin 0,05'den küçük olması terimin anlamlı olduğunu göstermektedir. Buna göre, regresyon modeli ve lineer terimlerin katsayıları yüzey pürüzlülüğü için %95 güven düzeyinde anlamlı iken etkileşimlere ait terimler anlamlı değildir yada diğer katsayılara göre nispeten az

bir etkiye sahiptir denilebilir. Oyma derinliği için tüm katsayılar %95 güven düzeyinde anlamlı değildir. Oyma derinliğine ait modelden elde edilen değer ile gerçek uygulamadan ölçülen değer arasındaki fark, bu durum ile açıklanabilir.

Çizelge 8.11 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için rasgele seçilmiş parametre ve değerleri için tahmini modelden ve gerçek uygulamadan elde edilen sonuçlar

Deney no	Deney koşulları	Tahmini Değer (YP)	Ölçülen Değer (YP)	Tahmini Değer (D)	Ölçülen Değer (D)
1	*G=60, H=200, F=20, TA=0,02*	2,59	2,56	38,60	42,43
2	*G=60, H=200, F=20, TA=0,03*	3,07	3,21	37,05	31,30
3	*G=100, H=200, F=20, TA=0,02*	3,95	3,93	41,36	43,05
4	*G=100, H=200, F=20, TA=0,03*	3,91	3,76	39,56	39,79
5	*G=60, H=200, F=30, TA=0,02*	3,44	3,39	36,10	32,57
6	*G=60, H=200, F=30, TA=0,03*	3,69	3,58	23,96	29,41
7	*G=100, H=200, F=30, TA=0,02*	4,35	4,46	48,93	46,94
8	*G=100, H=200, F=30, TA=0,03*	4,14	4,20	36,53	36,60
9	*G=60, H=400, F=20, TA=0,02*	1,74	1,67	13,64	14,70
10	*G=60, H=400, F=20, TA=0,03*	2,01	1,92	22,38	23,24
11	*G=100, H=400, F=20, TA=0,02*	3,4	3,53	21,28	43,33
12	*G=100, H=400, F=20, TA=0,04*	3,21	3,25	29,76	34,42
13	*G=60, H=400, F=30, TA=0,02*	1,86	2,02	27,05	25,70
14	*G=60, H=400, F=40, TA=0,03*	1,97	1,98	25,18	24,62
15	*G=100, H=400, F=30, TA=0,02*	3,05	2,84	44,74	51,62
16	*G=100, H=400, F=30, TA=0,03*	2,70	2,74	42,63	37,67

Çizelge 8.12 Tungsten Karbüre ait yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği için ANOVA sonuçları

Terim	Df	Yüzey Pürüzlülüğü (YP, Ra)			Oyma Derinliği (D)		
		SS	F	p	SS	F	p
Regresyon	10	10,8407	26,47	0,001	1480,66	3,11	0,111
Lineer	4	9,7329	59,42	0,000	884,83	4,65	0,061
Etkileşimler	6	1,1078	4,51	0,060	595,83	2,09	0,218
Artık hata	5	0,2047			237,67		
Toplam	15	11,0454			1718,32		

9. TARTIŞMA

Tüm malzeme grupları için deneysel çalışmalar sonrasında görülmüştür ki parametrelerden güç ve tarama hızı hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Tarama hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünde ve oyma derinliğinde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Tarama hızı lazer metal etkileşim süresini etkileyen değişkenlerden biridir (Bkz. Denklem 4.5). Lazer spot çapı sabit kalmak koşulu ile hızdaki artış lazer metal etkileşim süresini düşürmektedir. Etkileşim süresindeki azalma birim alana gönderilen enerji miktarında azalmaya sebep olmaktadır (Bkz. Denklem 4.7). Birim alanda enerji yoğunluğundaki azalma bazı durumlar için ışın spot çapının kapsadığı alandaki malzemede sadece ergime meydana getirirken, bazı durumlarda ise metali buharlaştıracak kadar ısı oluşturabilse bile buharlaşan metal miktarı yüksek olmaz. Deney sonuçları incelendiğinde hız dışındaki tüm parametreler sabitken hız yükselmesi ile oyma derinliğinde azalma meydana geldiği tespit edilmiş ve bunun sebebinin de buharlaşma sırasında etkileşim süresinin düşük olması ve birim alandaki enerji yoğunluğundaki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tarama hızı azaldıkça artan etkileşim süresi ve enerji yoğunluğu, etkileşim bölgesindeki oyuk derinliğini ve oyuk içinden dışa doğru yeniden katılaşan metallerin kalınlığını arttırmaktadır. Bu durum yüzeyde daha çok girinti ve çıkıntının oluşmasına sebep olmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün yüksek olmasının sebeplerinden biri bu durumdur.

Oyma derinliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün tarama hızına bağlı değişkenliğine etki eden diğer bir faktör ise çakışma oranlarıdır. Atım ve aralık çakışma olarak isimlendirilen iki çeşit çakışma oranı vardır. Atım çakışma oranını etkileyen üç değişken vardır (Bkz. Denklem 4.2). Bunlar frekans, ışın spot çapı ve tarama hızıdır. Frekans ve ışın spot çapı sabit kalmak koşulu ile tarama hızındaki azalma çakışma oranını azaltacaktır. Bu durum birim alanda daha az ışının ard arda sıralanması ve ışın çapının kapsadığı alana daha az ısının gönderilmesi demektir. Isıda meydana gelen azalma, buharlaşan metal miktarının da azalması demektir. Oyma derinliğinin artan hızla azalmasının ikinci sebebi de atım çakışma oranıdır. Çakışma oranındaki azalma, lazer ışının arda arda oluşturduğu oyukların ve kraterlerin sayısının da azalması demektir, ki bu durum yüzey pürüzlülüğünde azalma meydana getirmektedir.

Deney sonuçlarına göre hem yüzey pürüzlülüğüne hem de oyma derinliğine etkisinin olduğu tespit edilen diğer parametre lazer çıkış gücüdür. Tarama hızı ve ışın spot çapı sabit kalmak koşulu ile artan güç birim alandaki enerji yoğunluğunu arttırmaktadır. Artan enerji yoğunluğu, ısı girdisinde artış meydana getireceği için artan güç oyma derinliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte, güçteki artış lazer ışının temasta olduğu bölgede daha derin bir oyuk oluşmasına, oyuk içinde ve dışında yeniden katılaşmış tabaka kalınlığının da daha yüksek olmasına sebep olmaktadır. Bu durum yüzeyde daha çok pürüzlülük meydana getireceğinden yüzey pürüzlülüğü yüksek olmaktadır. Mikroyapı çalışmaları ve SEM incelemeleri güçteki artışın, oyuk içi ve oyuk dışına doğru katılaşmaların yüksek olduğunu göstermiştir. Benzer durum tarama hızı için de tespit edilmiştir. Tarama hızının yüzey pürüzlülük grafikleri ve SEM görüntüleriyle ilişkilendirilmesinde görülmüştür ki artan hız yüzey pürüzlülüğünde azalma ve yüzey profilinde iyileşme meydana getirmektedir. Mikroyapı ve SEM görüntüleri, rakamsal sonuçları doğrulamaktadır.

Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla uyuşmaktadır. Yasa and Kruth'a (2010) göre, tarama hızı hem yüzey pürüzlülüğünde hem de oyma derinliğine etkili bir faktördür. Tarama hızındaki artma, birim alandaki enerji yoğunluğunun azalmasına dolayısıyla oyma derinliğinde de azamaya sebep olmaktadır. Tarama hızının aynı zamanda çakışma miktarında da etkili olduğunu ve düşük hızın çakışma oranında artış meydana getirdiğini böylece oyma derinliğinin artacağını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar aynı zamanda lazer gücünün oyma derinliğinde direk etkili olduğunu ve artan gücün yüzey kalitesini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Samant and Dahotre'a (2009) göre, çakışma miktarındaki artma birim alandaki ısıyı arttırmaktadır ve birim alanda artan ısı, buharlaştırılan metal miktarını arttırmaktadır. Leone et al.'a (2009) göre, tarama hızındaki artma oyma derinliğinde belirgin bir azalma meydana getirmektedir. Semaltianos et al.'a (2008) göre, artan güç ve çakışma yüzey kalitesinde kötüleşme meydana getirmektedir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre frekans hem oyma derinliğinde hem de yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir etkiye sahip değildir. Frekans, çakışma oranlarını belirleyen değişkelerden biridir. Bu çalışmada kullanılan frekanslara göre değişken hızlardaki çakışma miktarları Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, tarama hızı ve ışın spot çapı sabit kalmak koşulu ile frekanstaki artış çakışma miktarında azalma meydana getirmektedir ve 30kHz ile 40kHz arasında atım çakışma miktarındaki değişim daha azdır.

Tungsten Karbür hariç diğer tüm malzemeler için hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için optimum farklı frekans değerinde elde edilmiştir. En derin oyuk 40kHz'deki frekansta ve en düşük yüzey pürüzlülüğü 20kHz'deki frekansta elde edilmiştir. Oyma derinliğinin frekansın en yüksek değerinde elde edilmesinin sebebi bu değerin en yüksek çakışma oranına sebep olmasından kaynaklanmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülüğünün 20kHz'de elde edilmesi de azalan çakışma oranından ve krater sayısından kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışmalar sonrasında yapılan SEM incelemelerindeki görüntülerde yüksek hızda, frekansın belirgin bir etki göstermediği görülmektedir. Frekansa bağlı yüzey pürüzlülük değerleri arasında büyük bir farklılık olmazken hıza bağlı yüzey pürüzlülük değerleri arasında belirgin fark vardır. Frekansa bağlı bu farkın düşük olması ve hıza bağlı yüzey pürüzlülük değerleri arasındaki farkın büyük olması, çakışma oranın artan hızla azalmasından ve ard arda gelen lazer oyuk (krater) sayısındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, SEM incelemelerinde, frekans sabit kalmak koşulu ile azalan hızla birlikte yüzey profilinde kötüleşme meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülük grafiklerindeki girinti çıkıntı yükseklikleri ve bunların rakamsal değeri de bu görüntüleri onaylamaktadır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan temel parametrelerinden bir diğeri de tarama aralığıdır. Tarama aralığının direkt enerji girdisi ile bir bağlantısı yoktur. Tarama aralığı aralık çakışmasında etkili olan bir değişkendir (Bkz. Denklem 4.4). Tarama aralığı arttıkça oyma derinliği ve yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Tarama aralığının artması çakışma miktarını azaltmaktadır ve bu durum kraterler arasındaki mesafeyi arttırmaktadır. Artan bu mesafe yüzey pürüzlülüğünü azaltmaktadır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda minimum yüzey pürüzlülüğü 0,03mm'de ve en yüksek oyma derinliği 0,02mm'de tespit edilmiştir.

Malzeme çeşidinden bağımsız olarak lazerle işlenmiş tüm yüzeylerde yeniden katılaşmış bir tabaka tespit edilmiştir. SEM ve optik mikroskop incelemelerinde bu tabakanın kalınlığında güç ve tarama hızının etkili olduğu buna karşın frekansın belirgin bir farklılık yaratmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, kesit resimlerde görülen yüzey profili, tarama aralığından bağımsızdır yani tüm oyma işlemleri sabit tarama aralığında (0,03mm) yapılmıştır. Bu profil, hızın ve frekansın etkileşimiyle oluşan atım çakışması tarafından oluşturulmuştur. Bu kapsamda, yeniden katılaşmış tabakanın oluşmasında birim alana uygulanan güç, etkileşim süresi ve çakışma oranı etkilidir denilebilir. Tabaka oluşumundaki bu üç etkenden etkileşim süresi ve çakışma oranı, hızın etkisiyle değişmektedir ve birim alana gönderilen enerji (ısı) yoğunluğunun miktarını belirleyen değişkendir.

AISI H13 takım çeliği için beyaz renkte görülen bu tabakanın belirgin olarak görülebildiği koşullar için değişmeyen parametre sadece tarama hızıdır ve bu hız en düşük değerdedir ki düşük hız etkileşim süresini ve çakışma oranını arttırmaktadır. Dolayısıyla birim alandaki ısı yoğunluğu da artmaktadır. Birim alandaki ısı yoğunluğunu arttıran diğer bir parametrede güçtür. Lazer gücündeki artışın ısı yoğunluğunu arttırdığı önceki bölümlerde ifade edilmişti. SEM incelemeleri sonrasında 30W etkin güçte yapılan oyma ile oluşan tabakanın kalınlığı 18W etkin güçte yapılan oyma ile oluşan tabakanın kalınlığına göre az da olsa fazlalık görülebilmektedir. AISI H13 takım çeliği için, yeniden katılaşmış tabakada (beyaz tabaka) yapılan sertlik ölçüm sonuçları göstermiştir ki deney şartları ne olursa olsun beyaz tabakanın sertliği 320HV ile 350HV arasında değişmektedir. Bu farklılığın sebebi, beyaz bölgenin dar olduğu deney şartlarında sertlik ölçümü sırasında bırakılan izin, tabakanın sınırına yakın olması ve farklı bir yapının iz genişliğinde bıraktığı etkidir. Sertlik ölçümü sırasında malzemede oluşan izin genişliği 10µm'dir. İz bırakılıp ölçüm alınabilen bölgenin köşegen uzunlukları iz genişliğine yakın ise izin tabakada oluşturduğu plastik deformasyon sonucu iz alanı ana malzemeye yaklaşacaktır. Bu sebepten iz genişliği büyüyecek ve sertlik değeri küçülecektir ki bu durum tabaka kalınlığı dar olan koşullarda tabakanın sertlik değerinin daha küçük çıkmasına sebep olmuştur. Tabaka kalınlığının dar olduğu bir koşul (gücün 18W olduğu, hızın 200 mm/s ve frekansın 40kHz olduğu) için yapılan sertlik ölçümünde bu azalma net olarak görülebilmektedir. Tabakanın geniş olduğu bölgede sertlik değeri ortalamada 350 HV iken tabaka kalınlığının düşük olduğu koşulda 260HV'dir.

AISI H13 takım çeliği için beyaz tabakada 10gr yükte yapılan sertlik ölçülerinde tabaka kalınlığının fazla olduğu ve iz oluşturulabilen parametrelerde yapılan analizlerde hız, sertlik üzerinde sadece tabaka kalınlığında etkili olduğu ve bu tabakanın sertliğinin diğer bölgelerin sertliğinden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sertlik sonuçlarına göre frekans, sertlik üzerinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Gücün sertlikte ihmal edilebilecek kadar küçük bir değişim meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 30W etkin güçteki ve 800mm/s'deki koşullar için frekansın iki değerinde ölçülen sertlik değerleri, 30W etkin güçte ve 200mm/s'deki koşullarda ölçülen değerlere göre daha yüksek çıkmıştır. AISI H13 takım çeliğinin işlem görmemiş durumdaki sertlik değeri yaklaşık olarak 200HV'dir. Lazerle işlenmiş yüzeylerin hemen alt tabakasından merkeze doğru 200µm'lik bir mesafeye kadar yapılan sertlik ölçümleri sonrasında merkeze yakın bölgelerde sertlik ölçümleri yapılmıştır ve bu bölgelerin sertliğinin 188 -192HV arasında değiştiği tespit edilmiştir. Genel bir değerlendirmeyle, 30W

etkin güç ve 800mm/s hız için yapılan deneysel çalışmalar için yapılan sertlik ölçüm değerleri işlem görmemiş malzemeye yakın değerler vermiştir. Bununla birlikte bu metallerin merkez sertlik değerleri işlenmemiş olanlara göre belirgin bir fark göstermemektedir. Bu durum yüksek gücün sadece malzemenin buharlaşma miktarında etkili olduğu ve yüzeyde herhangi bir düşüme sebep olmadığını göstermiştir.

AISI H13 takım çeliği için farklı oyma parametreleri ile oyulmuş iki farklı metale yapılan XRD analizleri sonucunda her iki metalin yüzeyinde de Fe elementinin piklerinin dışında ayrıca $Fe_{2.96}Si_{0,05}O_4$ (demirsilisyumoksit) bileşiğine de rastlanmıştır. Lazerle oyma işlemi herhangi bir koruyucu atmosfer altında yapılmadığından eriyen ve tekrar katılaşan yapının oksitlenmiş olması beklenen bir durumdur. Literatürde AISI H13 takım çeliğinin lazerle yüzey sertleştirme işlemleri sonrasında yüzeye yapılan XRD analizleri sonucunda yapıda $M_{23}C_6$ yada M_7C_3 (M = Cr, Fe) bileşikleri tespit edilmiştir. Yüzey sertleştirme işlemi oyma işlemine göre daha uzun zamanda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla dönüşüm için yeterince zaman olması yukarıdaki bileşiklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, bu tip bileşiklere rastlanmamıştır ve bunun muhtemel sebebinin, yapısal bir dönüşüm için yeterince zamanın olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatür araştırmaları sonrasında bu çalışmada elde edilen beyaz renkteki yapıya benzer bir yapının EDM ile yapılan oyma işlemleri sonrasında da oluşabildiği görülmüştür. (Haşçalık and Çaydaş, 2004), AISI D5 takım çeliğinin EDM ile yapılan oyma işleminde ısı etkisiyle yüzeyde eriyen metalin dielektrik sirkülasyonu ile oyuk yüzeyinden uzaklaştırıldığını ancak geriye kalan metalin oyuk içinde tekrardan katılaştığını belirtmişlerdir. Ayrıca prosesin hızlı gerçekleşmesi yani hızlı erime ve soğumanın yüzeyde kırılgan bir yapının oluşmasına sebep olduğunu ve bu yapının temperlenmemiş martenzit olabileceğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, oyulmuş yüzeyin en üst kısmındaki yapının da erime sonrasında çok hızlı katılaşan debrisler (artık kalıntılar) olarak tanımlamışlardır. Simon et al. (2005), beyaz tabakanın altındaki yapının daha geç ısınan ve yavaş soğuyan bir alan olduğunu ve tavlanmış bir yapıya sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ho and Newman (2003), çalışmalarında, EDM ile yapılan oyma işleminde sırasıyla yeniden katılaşmış tabaka, ısıdan etkilenmiş bölge ve etkilenmemiş bölge gibi 3 farklı tabakanın oluştuğunu belirtmişlerdir. Yeniden katılaşan tabakanın kalınlığının ve elektrotun yüzeyde meydana getirdiği ısıl hasarların işlem sırasında meydana gelen plazma ile bağlantılı olduğunu düşünmektedirler.

AISI 316 paslanmaz çelik için yapılan oyma işlemi sonrasında meydana gelen yeniden katılaşmış yapının ana metalle tam bir birleşme yapamadığı tespit edilmiştir. Lazer ışını metalle etkileşime geçtiği zaman bir oyuk oluşturur ve oyuğun içinde buharlaşamadan kalan ergimiş metalin hızlı soğuma sebebiyle katılaşırken yüzeyle tam bir bağ oluşturacak zamanı bulamadığı için yeniden katılaşan tabaka ile ana metal arasında birleşme noktalarında boşluklar oluşturmaktadır. SEM incelemelerinde belirgin olarak görülebilen bu boşlukların oluşma sebebinin hızlı katılaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir.

AISI H13 takım çeliğinde olduğu gibi AISI 316 paslanmaz çelik malzeme için de artan hız yeniden katılaşmış tabaka kalınlığını düşürmüştür. Düşük hız, etkileşim süresini ve çakışma oranını arttırmaktadır ve dolayısıyla ısı girdisinde de artış meydana getirmektedir. Artan ısı girdisi, metali buharlaştırma sıcaklığına ulaştıracağından buharlaşma sonrası geride kalan ergimiş metal miktarı yüksek olacağından hızlı soğuma sonrası katılaşan tabakanın kalınlığının da yüksek olacağı düşünülmektedir.

AA 7075 alüminyum alaşımında yeniden katılaşma sonrasında oluşan tabaka kalınlığı ve tabakanın profili AISI H13 takım çeliğinde ve AISI 316 paslanmaz çelikte oluşan tabakalara göre daha kalın ve kaba bir profile sahip. Bu kaba profilin oluşumuna homojen olmayan süreksiz katılaşma olayının sebep olduğu düşünülmektedir.

AA 7075 alüminyum alaşımında, gücün en yüksek olduğu (30W) ve hızın en düşük olduğu (200 mm/s) koşulda en yüksek tabaka kalınlığı tespit edilmiştir. Gücün ve hızın bu değeri yüksek ısı girdisinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Düşük hız, yüksek çakışma oranı ve etkileşim süresi demektir ki bu durum yüksek ısı oluşumunda ve oyuk içi katılaşma formunda etkili olmaktadır. Yüksek ısı girdisi buharlaşan metal miktarını arttırmaktadır. Bununla birlikte, alüminyum alaşımlarının ısı iletkenlik katsayılarının yüksek olması sebebiyle lazerden metale aktarılan ısının büyük bir kısmının malzeme içinde tutulması söz konusudur. Yüksek sıcaklıkla birlikte meydana gelen buharlaşma sonucu oluşan plazma geride kalan ergimiş metalin daha yavaş soğumasına sebep olmaktadır ki bu durum ard arda yapılan çoklu yüzey taramalarında soğumanın daha da yavaş gerçekleşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte ışın metalle etkileşime geçtiğinde çeliğe göre daha derin bir oyuk oluşturmaktadır. Dolayısıyla oyuk içinde kalan ergimiş metalin plazma oluşumu durumunda oyuk içinden kaçamaması sonucu en son tarama sonrasında oyuk içinde katılaşmasını

tamamlayacaktır. Bu iki durum yani plazma sonrası yüksek miktarda ergimiş metalin oyuk içinden çıkamayıp bulunduğu yerde katılaşmasını tamamlaması ve alüminyumum soğuma hızının yavaş olması yeniden katılaşan tabaka kalınlığının yüksek olmasının sebebi olduğu düşünülmektedir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğündeki artışın da sebebi olduğu düşünülmektedir.

AA 7075 alüminyum alaşımının oyma derinliği AISI H13 takım çeliğine ve AISI 316 paslanmaz çeliğine göre yüksek çıkmıştır. Bu durum alüminyum alaşımının ısı iletkenlik katsayısının yüksek olmasıyla ilişkilendirilmiştir. AA 7075 alüminyum alaşımında sertlik değerleri incelendiğinde 2 nolu deney koşulu hariç sertlikte belirgin bir değişim tespit edilememiştir. Bu deney koşulunda çakışma oranı en yüksek (düşük hız ve yüksek frekans) değerdedir.

Tungsten Karbürde oyulma işlemi sonrasında oluşan yeniden katılaşmış tabaka kalınlığı için en yüksek kalınlık hızın düşük olduğu değerde (200mm/s) tespit edilmiştir. Düşük hız, lazer ışınıyla metal arasındaki etkileşim süresini düşürerek ve atım çakışma miktarını arttırarak birim alandaki ısı miktarını arttırmaktadır. Yüksek ısı sebebiyle buharlaşma sonrası oyuk içinde ve oyuk içinden yüzeyin üst kısmına doğru ergimiş metalin katılaşmasıyla oluşan yeni tabaka ana yapıdan farklı bir yapı göstermektedir. Oyuk içinde ve yüzeyde katılaşma sonrasında yeniden katılaşan tabakanın yüzeyle birleşme durumunda bazı süreksizliklerin olduğu görülmektedir. Bu süreksizliğin iki sebebinin olduğu düşünülmektedir. Bunlardan biri, Tungsten Karbürün yapısından kaynaklanan boşluklu yapının ergime ve buharlaşma ile birlikte varlığını sürdürmesi ve ergimiş metalin boşlukları dolduramaması, diğeri de katılaşmanın hızlı gerçekleşmesi sonucu Tungsten Karbürdeki boşluklu bölgelerin dışında kalan bölgelerle ergimiş metalin bağ oluşturma eğilimidir.

Tüm malzeme grupları için açısal taramalarda 45° ve 45°/-45°' deki tarama yönlerinde yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksek ve oyma derinliği değerleri daha düşük çıkmıştır. Bu açılar için lazer ışınlarının üst üste ve yan yana gelme şekillerindeki farklılıkların hem yüzey pürüzlülük değerini arttırdığı hem de oyma derinliği değerini düşürdüğü düşünülmektedir.

10. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında 30W gücünde Fiber lazer markalama sistemi kullanılarak AISI H13, AISI 316, AA 7075 ve Tungsten Karbür malzemelerin yüzeyinde 10x10 mm^2'lik bir alanda oyma işlemi gerçekleştirilmiş ve işlem parametreleri olarak lazer çıkış gücü, tarama hızı, frekans, tarama aralığı ve tarama yönü seçilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarım metodu kullanılarak bir deney düzeni oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar 3 farklı çalışmada değerlendirilmiştir. Bunlar;

- Parametrelerin her bir değeri için deneysel çalışmalar sonrasında ölçülen yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği değerlerinin noktasal dağılımına göre parametrelerin etkileri yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

- En düşük yüzey pürüzlülüğü ve en büyük oyma derinliği için her bir malzeme çeşidi için parametrelerin değerleri tespit edilmiştir. Ve bu değerler için mikroyapı ve sertlik analizleri yapılmıştır.

- Tam faktöriyel deney düzenine göre yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak Regresyon analizi ile her bir malzeme çeşidi için matematiksel modeller oluşturulmuştur.

Bu kapsama göre gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. Lazerle oyma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünde (Ra) en etkili parametreler sırasıyla tarama hızı, güç ve tarama aralığı olarak tespit edilmiştir. Tüm malzeme çeşitleri için artan tarama hızı hem yüzey pürüzlülüğünü hem de oyma derinliğini düşürmüştür. Bu sonuç lazer ışını ile metal arasındaki etkileşim süresi ve çakışma oranlarıyla ilişkilendirilmiştir. Düşük hızda etkileşimin yüksek olması birim alana birim sürede aktarılan ısı enerjisinin yüksek olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca çakışma oranın da yüksek olması, birim alandaki enerji yoğunluğunu arttırmaktadır. Artan enerji yoğunluğu buharlaşan malzeme miktarını da arttırmaktadır. Ayrıca mikroyapı görüntülerinde de görüldüğü gibi etkileşim süresi yüksek olduğunda lazer ışınının temasta olduğu bölgede daha derin bir oyuk meydana gelmektedir ki bu durum, girinti ve çıkıntı yüksekliğini arttırmaktadır. Böyle bir durumun yüzey

pürüzlülüğünde de artış meydana getirmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değeri 200mm/s'deki hızda yapılan oyma işlemlerinde ve en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri de 800mm/s'deki hızda yapılan oyma işlemlerinde tespit edilmiştir. Buna göre 800mm/s'de ölçülen en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri AISI H13 için 1,75µm, AISI 316 için 2,17µm ve AA7075 alüminyum alaşımı için 3,86µm'dir. Tungsten Karbür için çalışmalarda kullanılan en yüksek hız 400mm/s'dir ve bu hızda ölçülen en küçük yüzey pürüzlüğü değeri 1,67µm'dir.

2. Artan güç hem yüzey pürüzlülüğünü (Ra) hem de oyma derinliğini arttırmıştır. Bu sonuç da yine enerji yoğunluğu ile ilişkilendirilmiştir. En yüksek oyma derinliği 30W etkin güçte yapılan oyma işlemlerinde ve en düşük oyma derinliği de 18W etkin güçte yapılan oyma işlemlerinde tespit edilmiştir. Buna göre 30W güçte ölçülen en büyük oyma derinliği değeri AISI H13 için 195µm, AISI 316 için 228µm, AA7075 alüminyum alaşımı için 1,02mm'dir ve Tungsten Karbür için 51,62µm'dir.

3. Deney sonuçlarına göre, frekansın hem yüzey pürüzlülüğü (YP, Ra) hem de oyma derinliğinde belirgin bir değişim yaratmadığı tespit edilmiştir. Benzer bir sonuç varyans analizde elde edilmiştir. ANOVA analizleri sonucunda frekansın deney sonuçlarında belirgin değişikler yaratmadığı tespit edilmiş ve hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için etki yüzdesi, diğer parametrelere göre çok düşük çıkmıştır. İstatistiksel analiz sonuçlarının hepsi frekansın yüzey pürüzlülüğü ve oyma derinliği üzerinde 0,05 güven düzeyinde etkili bir parametre olmadığını göstermektedir.

4. Tarama aralığı sadece aralık çakışmasını etkilediğinden ve aralık çakışmasının yüksek olması da birim alandaki enerji yoğunluğunu artırması sebebiyle tarama aralığı, tarama hızı ve güç kadar etkili olmasa da hem yüzey pürüzlülüğünde hem de oyma derinliğinde etkili bir parametredir. İstatistiksel analiz sonuçlarının neredeyse hepsi 0,05 güven düzeyinde tarama aralığının oyma derinliği üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

5. Tarama yönünün yüzey pürüzlülüğünde ve oyma derinliğinde etkili olduğu tespit edilmiştir. AISI H13 takım çeliği ve AISI 316 paslanmaz çeliği için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0° ve 90°/0°'de yapılan oyma

koşulunda elde edilirken en yüksek oyma derinliği de 0°'de yapılan oyma koşulunda elde edilmiştir. AA 7075 alüminyum alaşımı için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0°'de yapılan oyma koşulunda elde edilirken en yüksek oyma derinliği de 0°'de yapılan oyma koşulunda elde edilmiştir. Tungsten Karbür için en düşük yüzey pürüzlülüğü 0°'de yapılan oyma koşulunda elde edilirken en yüksek oyma derinliği de 45°/0°'de yapılan oyma koşulunda elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre deneysel çalışmalarda kullanılan tüm malzeme çeşitleri için en küçük yüzey pürüzlülüğü değeri 0°'deki tarama yönünde elde edilmiştir. Bununla birlikte Tungsten Karbür hariç tüm malzeme çeşitleri için en büyük oyma derinliği değeri paralel tarama yönlerinde (0° ve 90°/0°) elde edilmiştir. Bu durum benzer uygulamalar için bu tarama yönlerinin diğer malzeme grupları içinde kullanılabileceğini göstermektedir.

6. Tüm malzemeler için yapılan mikroyapı analizlerinde yüzeyde ve oyuk içinde yeniden katılaşmış bir tabaka (yapı) tespit edilmiştir. Bu yapının kalınlığı lazer çıkış gücüne ve tarama hızına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek güç ve düşük tarama hızındaki tabaka kalınlığı düşük güç ve yüksek tarama hızında oluşan tabaka kalınlığına göre daha yüksektir. Bu tabakanın buharlaşma sonrasında kalan ergimiş metalin, çok hızlı katılaşması sonucu oyuk içinde ve oyuk dışına doğru yönlenmesi ile oluşmuş bir yapı olduğu düşünülmektedir. Bu katılaşma sonrasında hızlı soğumanın da etkisiyle yüzeyle tam birleşme yapmadığı, boşlukların ve süreksizliklerin meydana geldiği görülmüştür. Bu boşluklar ve süreksizlikler tabakanın sertliğinin ölçülmesinde de sıkıntılar yaratmıştır. AISI H13 hariç diğer malzemeler için bu yeniden katılaşmış tabakanın sertlik ölçümü mümkün olamamıştır. AISI H13 için sertlik izi oluşturulan bölgelerde yapılan mikro sertlik incelemelerinde bu tabakanın sertliğinin, tabakanın dışında kalan bölge ve ana metal sertliğinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

7. Lazerle oyulmuş yüzeyin hemen alt tabakasından başlayarak 25µm aralıklarla serlik ölçümleri yapılmıştır ve sertlikte, mesafeye bağlı belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, parametrelere bağlı olarak sertlikte değişim gözlenememiştir.

8. Tüm malzeme çeşitlerinin oyma işlemi sonrasında hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için elde edilen sonuçlara göre

yapılan istatistiksel analizlerin hepsinde 0,05 güven düzeyinde en etkili parametreler hız ve güç olarak tespit edilmiştir.

9. Deney sonuçları kullanılarak elde edilen tahmini matematiksel modeller parametrelerin hem modelde kullanılan değerleri için hem de model de kullanılmayan değerleri için test edilmiştir. Test sonuçları göstermiştir ki modelden hesaplanan sonuçlar ile gerçek uygulamadan ölçülen sonuçlar bazı koşullar için ihmal edilebilecek kadar bir farkla bir birbirine yakın çıkmıştır. Hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arsındaki fark en fazla %15-20 arasında değişmektedir. Bu fark modelin ortalama değerlere göre oluşturulmasından kaynaklanmaktadır. Deney sonuçlarından ölçülen değerlerin hesaplanan değerlerle yakın sonuçlar vermesi oluşturulan model çok güçlü olduğunu göstermektedir.

11. ÖNERİLER

Lazerle oyma işlemindeki en önemli faktör, lazer ışınının metalle olan odak mesafesidir ve bu mesafe lazer ışınından metale aktarılan güç yoğunluğunda oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Mesafenin artması yada azalması güç yoğunluğunda ve işlem veriminde azalmaya sebep olur.

Her lazer sisteminin maksimum güç yoğunluğuna sahip olduğu bir odak mesafesi vardır. Oyma vb. uygulamalarda odak mesafesi gittikçe artacağından belli bir mesafeden sonra güç yoğunluğunda azalma olacaktır. Bu sebepten, derin oymaya yönelik çalışmalarda güç yoğunluğunu maksimumda tutabilmek için odak mesafesinin derinlik yönünde değişmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada 30W fiber lazer markalama cihazı kullanılarak dört farklı malzeme grubuna derin oyma işlemi gerçekleştirilmiştir. Prosese etkisinin olduğu düşünülen beş parametre (lazer çıkış gücü, tarama hızı, frekans, tarama aralığı ve tarama yönü) için yüzey pürüzlülüğünde ve oyma derinliğinde ortaya çıkan değişmeler araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile hem yüzey pürüzlülüğü hem de oyma derinliği için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu tahmini matematiksel modeller ile endüstride benzer uygulamalarda hem oyma derinliği hem de yüzey pürüzlülüğü için yaklaşık sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte, derinlikle birlikte odak mesafesini sabit tutacak bir sistemin kurulmasında, oluşturulan bu matematiksel modellerden elde edilen sonuçlara benzer sonuçların elde edilmesine yardımcı olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akkurt, M. 2004, Kalite Kontrol, 400 – 500, Birsen Yayınları, İstanbul, 688s:

Akman, E., Demir, A., Canel, T. and Sınmazçelik, T., 2009, Laser welding of Ti6Al4V titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 21: 3705-3713.

Almeida, I.A., Rossi, W.D, Lima, M.S.F., Berretta, J.R., Nogueira, G.E.C, Wetter, N.U. and Vieira, N.D., 2006, Optimization of titanium cutting by factorial analysis of the pulsed Nd:YAG laser parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 179: 105-110.

Anawa, E.M. and Olabi, A.G., 2008, Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components, *Optics & Laser Technology*, 40:379-388.

Bağcı, E. and Aykut, Ş., 2006, A study of Taguchi optimization method for identifying optimum surface roughness in CNC face milling of cobalt-based alloy (stellite 6), *Int J Adv Manuf Technology*,29: 940–947.

Bassani, P., Capello, E., Colombo, D., Previtali, B. and Vedani, M., 2007, Effect of process parameters on bead properties of A359/SiC MMCs welded by laser, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38: 1089-1098.

Basu, A., Chakraborty, J., Shariff, S.M., Padmanabham, G., Joshi, S.V., Sundararajan, G., Majumdar, J.D. and Mana, I., 2007, Laser surface hardening of austempered (bainitic) ball bearing steel, *Scripta Materialia*, 56: 887–890.

Berretta, J.R., Rossi, W., Neves, M. D.M., Almeida, I. A. and Junior, N.D.V., 2007, Pulsed Nd:YAG laser welding of AISI 304 to AISI 420 stainless steels, *Optics and Lasers in Engineering*, 45: 960-966.

Boutinguiza, M., Pou, J., Lusquiños, F., Quintero, F., Soto, R., Pérez-Amor, M., Watkins, K. and Sten, W.M., 2002, CO_2 laser cutting of slate, *Optics and Lasers in Engineering*, 37: 15-25.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Campanelli, S.L., Ludovico, A.D., Bonserio, C., Cavalluzzi, P. and Cinquepalmi, M., 2007, Experimental analysis of the laser milling process parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 191: 220–223.

Casalino, G. and Ghorbel, E., 2008 Numerical model of CO_2 laser welding of thermoplastic polymers, *Journal of Materials Processing Technology*, 207: 63-71.

Chen, Y.H., Tam, S.C., Chen, W.L. and Zheng, H.Z., 1996, Application of Taguchi metod in the optimization of laser microengraving of photomasks, *International Journal of Materials & Product Technology*,11: 333-344.

Chiang, K.A. and Chen, Y.C., 2005, Laser surface hardening of H13 steel in the melt case, *Materials Letters*, 59: 1919– 1923.

Colaço, R. and Vilar, R., 1998, Effect of laser surface melting on the tempering behaviour of DIN X42Cr13 stainless tool steel, *Scripta Materialia*, 38: 107-113.

Dahotre, **N.B. and Harimkar, S.**, 2008, Laser Fabrication and Machining of Materials, 1-200, Springer, 558p.

Dubey, A. K. and Yadava, V., 2008, Optimization of kerf quality during pulsed laser cutting of aluminium alloy sheet, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 412-418.

Eltawahni, H.A., Olabi and A.G., Benyounis, K.Y., 2010, Effect of process parameters and optimization of CO2 laser cutting of ultra high-performance polyethylene, *Materials and Design*, 31: 4029–4038.

Golnabi., H, and Bahar M., 2009, Investigation of optimum condition in oxygen gas-assisted laser cutting, *Optics & Laser Technology*, 41: 454–460.

Grum, J. and Kek, T., 2004, The influence of different conditions of laser-beam interaction in laser surface hardening of steels, *Thin Solid Films*, 453 –454: 94–99.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Hasçalık, A. and Çaydaş, U., 2004, Experimental study of wire electrical discharge machining of AISI D5 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 148: 362 – 367.

Ho, K. H. and Newman, S. T., 2003, State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 1287-1300.

Kaldos, A., Pieper, H.J., Wolf, E. and Krause, M., 2004, Laser machining in die making—a modern rapid tooling process, *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156: 1815–1820.

Katsamas, A.I. and Haidemenopoulos, G.N., 1999, Surface hardening of low-alloy 15CrNi6 steel by CO2 laser beam, *Surface and Coatings Technology*, 115: 249–255.

Kleine, K., Fox W. and Watkins, K., 2003, Fiber Laser for Micro Cutting of Metals, Fiber Laser for Micro Cutting of Metals Photonics West, 2003 San Jose Convention Center, San Jose, CA, USA,

Kleine, K., Fox, W. and Watkins, K., 2004, Micro Welding With Pulsed Single Mode Fiber Lasers, 23rd International Congress On Application Of Lasers And Electro-Optics, Scottsdale, October 4-7, M501, Laser Institute Of America, Publication No: 597, Vol97, Isbn 0-912035-77-3

Kumar, V.C., 2006, Process parameters influencing melt profile and hardness of pulsed laser treated Ti–6Al–4V, *Surface & Coatings Technology*, 201: 3174–3180.

Lei, H. and Lijun, Li., 1999, A study of laser cutting engineering ceramics, *Optics & Laser Technology*, 31: 531-538.

Leone, C., Lopresto, V. and De Iorio I., 2009, Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd:YAG green laser, *Optics and Lasers in Engineering*, 47: 161-168.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Leone, C., Genna, S., Caprino, G. and Iorio, I.De., 2010, AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd: YAG laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1297-1303.

Lim, S. H., Lee, C. M. and Chung W.J., 2006, A study on the optimal cutting condition of a high speed feeding type laser cutting machine by using Taguchi method, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 7: 18-23.

Liu, X., YU, G., Guo, J., Shang Q., Zhang Z. and Gu Y., 2007 Analysis of Laser Surface Hardened Layers of Automobile Engine Cylinder Liner, *Journal of Iron And Steel Research*, 14: 42-46.

Majumdar, J. D. and Manna, I., 2003, Laser processing of materials, 28: 495–562, DOI: 10.1007/BF02706446

Matoorian, P., Sulaiman, S. and Ahmad, M.M.H.M., 2008, An experimental study for optimization of electrical discharge turning (EDT) process, *Journal of Materials Processing Technology*, 204: 350-356.

Mei, L., Chen, G., Jin, X., Zhang, Yi. and Wu, Q., 2009, Research on laser welding of high-strength galvanized automobile steel sheets, *Optics and Lasers in Engineering*, 47: 1117–1124.

Melkote, S., Kumar, M., Hashimoto, F. and Lahoti, G., 2009, Laser assisted micro-milling of hard-to-machine materials, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58: 145-48.

Montgomery, D. C., 2001, Design and Analysis of Experiments, 1- 400 New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 672p.

Nalbant, M., Gökkaya, H. and Sur, G., 2007, Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning, *Materials & Design*, 28:1379-1385.

Niu, J., Pan, L., Wang, M., Fu, C. and Meng, X., 2006, Research on laser welding of aluminum matrix composite SiCw/6061, *Vacuum*, 80: 1396–1399.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Okon, P., Dearden, G., Watkins, K., Sharp, M. and French, P., 2002, Laser welding of aluminium alloy 5083, 21st International Congress on Application of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale, October 14-17, (ICALEO 2002) ISBN 0-912035-72-2

Pashby, I.R., Barnes, S. and Bryden, B.G., 2003, Surface hardening of steel using a high power diode laser, *Journal of Materials Processing Technology*, 139: 585–588.

Riveiro A., Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R. and Pou J., 2010, Parametric investigation of CO2 laser cutting of 2024-T3 alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 210:1138–1152.

Qi, J., Wang K.L. and Zhu, Y.M., 2003, A study on the laser marking process of stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 139: 273-276.

Samant, A.N. and Dahotre, N.B., 2010, Three-dimensional laser machining of structural ceramics, *Journal of Manufacturing Processes*, 12:1-7.

Selvan, S., Subramanian, K. and Nath, A.K., 1999, Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 5135) steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 91: 29–36.

Semaltianos N.G, Perrie, W., French, P., Sharp, M., Dearden, G. and Watkins, K.G., 2008, Femtosecond laser surface texturing of a nickel – based superalloy, *Applied Surface Science*, 255: 2796-2802.

Shanjin, Lv. and Yang, W., 2006, An investigation of pulsed laser cutting of titanium alloy sheet, Optics and Lasers in Engineering 44: 1067–1077.

Shin, H.J., Yoo, Y.T., Ahn, D.G. and Im, K., 2007 Laser surface hardening of S45C medium carbon steel using ND:YAG laser with a continuous wave, *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188: 467–470.

Shin, H. J. and Young, T. Y., 2008, Microstructural and hardness investigation of hot-work tool steels by laser surface treatment, *Journal of Materials Processing Technology*, 201: 342–347.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Slocombe, A. and Li, L., 2000, Laser ablation machining of metalrpolymer composite materials, *Applied Surface Science*, 154–155: 617–621.

Song, Y.G., Li, W.S., Li, L. and Zheng, Y.F., 2008, The influence of laser welding parameters on the microstructure and mechanical property of the as-jointed NiTi alloy wires, *Materials Letters*, 62: 2325-2328.

Soveja, A., Cicela, E., Grevay, D. and Jouvard, J.M., 2008, Optimisation of TA6V alloy surface laser texturuing using an experimental design approch, *Optics and Laser in Engineering*, 46:671-678.

Svelto, O., 2010, Principles of Lasers, 1-100, Springer, 607p.

Tarakçıoğlu N. ve Özcan M., 2004, Lazerler ve Materyal İşleme Uygulamaları, 1-100, Aslan Yayınları, Ankara, 197s.

Tosun, N., Çoğun, C. and Tosun., G., 2004, A study on kerf and material removal rate in wire electrical discharge machining based on Taguchi method, *Journal of Materials Processing Technology*, 152: 316–322.

Yasa, E. and Kruth, J.P., 2010, Investigation of laser and parameters for selective laser erosion, *Precision Engineering*, 34: 101-112.

Zhu, J., Li, L. and Liu, Z., 2005, CO_2 and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy, *Applied Surface Science*, 247: 300-306.

Wendland, J., Harrison, P. M., Henry, M. and Brownell, M., 2005, Deep engraving of metals for the automotive sector using high average power diode pumped solid state lasers, ICALEO – October 2005, Miami, USA

"Atom Modeli", http://img7.imageshack.us/img7/9563/atommodel03.gif, (Erişim tarihi: 03 Haziran 2010)

"Atom Modeli", www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf (Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

"Basic Laser Principles", www.bgu.ac.il/~glevi/website/Guides/lasers.pdf (Erişim tarihi: 20 Haziran 2010)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

"Laser Fundamentals", "Types of laser", http://www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/laser/fundamentals.htm (Erişim tarihi: 10 Haziran 2010)

"Laser beams, stimulated emission", http://machine-tools.netfirms.com/21_laser_versus_water_jet.htm (Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

"Yüzey Pürüzlülük ölçümü", http://w3.balıkesir.edu.tr/~tkerem/yuzeypuruzluluguanlatim.pdf (Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

"Vickers hardness", http://www.twi.co.uk/content/jk74.html (Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

"SEM", Nigde Üniversitesi, host.nigde.edu.tr/.../ELEKTRON%20TARAMALI%20MİKROSKOP%20_SEM.pdf (Erişim tarihi: 2 Haziran 2010)

ÖZGEÇMİŞ

Şefika KASMAN, 1975 yılında Ş. Urfa'da doğdu. 1997 yılında Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliğinden mezun oldu. 2001 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliğinde yüksek lisansını, 2003 yılında Matematik Öğr. Tezsiz yüksek lisansını tamamladı. 2005 yılından beri Dokuz Eylül Üniversitesi İzmir Meslek Yüksekokulu Teknik Programlar Bölümde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır.