

**AISI 1050 ÇELİĞİNİN AŞINDIRICI SU JETİ İLE
TORNALANMASINDA FARKLI
PARAMETRELERİN TALAŞ KALDIRMA ORANI
VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**2015
DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

Fuat KARTAL

**AISI 1050 ÇELİĞİNİN AŞINDIRICI SU JETİ İLE TORNALANMASINDA
FARKLI PARAMETRELERİN TALAŞ KALDIRMA ORANI VE YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Fuat KARTAL

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2015**

Fuat KARTAL tarafından hazırlanan “AISİ 1050 ÇELİĞİNİN AŞINDIRICI SU JETİ İLE TORNALANMASINDA FARKLI PARAMETRELERİN TALAŞ KALDIRMA ORANI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 20/01/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Muammer NALBANT (GÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Refik POLAT (KBÜ)

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR (KBÜ)

.....

Üye : Yrd. Doç. Dr. Memiş IŞIK (KBÜ)

.....

...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim”

Fuat KARTAL

ÖZET

Doktora Tezi

AISI 1050 ÇELİĞİNİN AŞINDIRICI SU JETİ İLE TORNALANMASINDA FARKLI PARAMETRELERİN TALAŞ KALDIRMA ORANI VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Fuat KARTAL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Ocak 2015, 138 sayfa

Bu çalışmada, aşındırıcı su jeti ile tornalama işleminde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine ve talaş kaldırma oranına etkileri araştırılmıştır. Aşındırıcı su jeti (ASJ) ile tornalama yapabilmek için özel torna deney düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen deney düzeneği ile AISI 1050 çeliği, işleme parametreleri olarak iki farklı nozul çapı, üç farklı nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, torna devri ve nozul yaklaşma mesafesi tam faktöriyel deney düzeni oluşturularak tornalanmıştır. Tam faktöriyel analizde varyans analizi, doğrusal regresyon analizi, pareto analizi, üç boyutlu yüzey grafik analizi ve optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Pompa basıncı (350 MPa) ve aşındırıcı garnet (120 mesh) sabit tutulmuştur. AISI 1050 çeliği üzerinde nozul çapı, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, torna devri ve nozul yaklaşma mesafesine bağlı olarak yapılan tornalama deneyleri sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve talaş kaldırma oranı

üzerinde nozul ilerleme miktarı en etkili parametre olarak görülmüştür. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,7 mm nozul çapı, 5 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 350 g/dak aşındırıcı akış oranı, 2 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2500 dev/dak torna devrinde (1 µm) elde edilmiştir. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü, 1,3 mm nozul çapı, 45 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 50 g/dak aşındırıcı akış oranı, 18 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 500 dev/dak torna devrinde (3,92 µm) elde edilmiştir. En çok talaş kaldırma oranı 1,3 mm nozul çapı, 5 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 350 g/dak aşındırıcı akış oranı, 18 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2500 dev/dak torna devrinde (64,80 mm³/dak) elde edilmiştir. En az talaş kaldırma oranı 0,7 mm nozul çapı, 45 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 50 g/dak aşındırıcı akış oranı, 2 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 500 dev/dak torna devrinde (4,51 mm³/dak) elde edilmiştir. ASJT ile işlenen AISI 1050 çeliği numunelerinde yapılan mikro sertlik analizlerinde en yüksek değer aşındırıcı akış oranının en çok kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. Aşındırıcı akış oranının artmasına bağlı olarak iş parçası yüzeyinde aşındırıcı garnet partiküllerinin yüzeyde yapışma yoğunluğu artmıştır.

Anahtar Sözcükler : Aşındırıcılı su jeti (ASJ), aşındırıcılı su jeti ile tornalama (ASTJ), AISI 1050 çeliği, ortalama yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı, tam faktöriyel analiz.

Bilim Kodu : 914.1.066

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

ANALYSIS OF THE INFLUENCES OF DIFFERENT PARAMETERS ON MATERIAL REMOVAL RATE AND SURFACE ROUGHNESS DURING THE MACHINING PROCESS OF AISI 1050 STEEL USING ABRASIVE WATER JET TURNING

Fuat KARTAL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

January 2015, 138 pages

This study, explores the impact of the machining parameters of the abrasive water jet turning process on the average surface roughness value and material removal rate. A custom experiment setup was developed in order to be able to turning with abrasive water jet (AWJT). The experiment setup designed lathed AISI 1050 steel in a full factorial experiment setting using two different nozzle diameters, three different nozzle feed rate, abrasive flow rate, spindle speed and nozzle stand-off distance. ANOVA, linear Regression analysis, Pareto analysis, 3D surface graphic analysis and optimization were conducted. Pump pressure (350 MPa) and abrasive garnet (120 mesh) were constant. The average surface roughness values and material removal rate obtained as a result of the experiments conducted on AISI 1050 steel based on nozzle diameters, nozzle feed rate, abrasive flow rate, spindle speed and

nozzle stand-off distance showed that nozzle feed rate is the most significant parameter among others. The lowest average surface roughness was obtained using 0,7 mm nozzle diameter, 5 mm/min nozzle feed rate, 350 g/min abrasive flow rate, 2 mm nozzle stand-off distance and 2500 rpm spindle speed (1 μm).The highest average surface roughness was obtained using 1.3 mm nozzle diameter, 45 mm/min nozzle feed rate, 50 g/min abrasive flow rate, 18 mm nozzle stand-off distance and 500 rpm spindle speed (3.92 μm).The highest material removal rate was obtained using 1.3 mm nozzle diameter, 5 mm/min nozzle feed rate, 350 g/min abrasive flow rate, 18 mm nozzle stand-off distance and 2500 rpm spindle speed (64.80 mm^3/min).The lowest material removal rate was obtained using 0.7 mm nozzle diameter, 45 mm/min nozzle feed rate, 50 g/min abrasive flow rate, 2 mm nozzle stand-off distance and 500 rpm spindle speed (4.51 mm^3/min).The micro roughness analysis conducted on the AISI 1050 steel samples machined with AWJT showed that the highest values were obtained where abrasive flow rate is higher. As a result of the increasing abrasive flow rate, abrasive garnet particles are more likely to get stuck on the workpiece.

Key Word : Abrasive water jet (AWJ), abrasive water jet turning (AWJT), AISI 1050 steel, the average surface roughness, material removal rate, full factorial analysis.

Science Code : 914.1.066

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yardım ve desteklerinden dolayı, sayın Prof. Dr. Muammer NALBANT ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan SUR hocalarıma çok teşekkür ederim.

Çalıőmayı finansal olarak destekleyen Karabük Üniversitesi ve Kastamonu Üniversitesi Rektörlüęü Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetimi Koordinatörlüęüne ve çalıőanlarına çok teşekkür ederim.

Sevgili aileme, maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgmeden sabırla yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xx
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
AŞINDIRICILI SU JETİ İLE İŞLEME YÖNTEMİ	3
2.1. GİRİŞ.....	3
2.2. AŞINDIRICILI SU JETİ.....	4
2.2.1. Aşındırıcı Su Jetinin Tarihçesi	4
2.2.2. Aşındırıcı Su Jeti Tezgâhı	5
2.2.3. ASJ’de Kullanılan Pompalar	7
2.2.3.1. Doğrudan Tahrikli Pompalar	7
2.2.3.2. Hızlandırıcı Esaslı (İntensifier) Pompa.....	8
2.2.4. Aşındırıcı Su Jeti Nozulları	9
2.2.5. Aşındırıcı Besleme Ünitesi	10
2.2.6. Aşındırıcı Parçacıklar	10
2.2.7. Aşındırıcı Su Jetinde Kullanılan Su Kalitesi	12
2.2.8. Aşındırıcı Su Jeti ile İşlemede kullanılan Parametreler	13
2.2.9. Aşındırıcı Su Jetinin Kullanıldığı Alanlar	13
2.2.10. Aşındırıcı Su Jetinin Avantaj ve Dezavantajları.....	14

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3.....	16
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	16
3.1. GİRİŞ.....	16
3.2. AŞINDIRICILI SU JETİ İLE TORNALAMA ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	17
3.3. DİĞER SU SETİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	34
3.4. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ	40
BÖLÜM 4	43
MATERYAL VE METOD	43
4.1. AŞINDIRICILI SU JETİ TORNA TEZGÂHI TASARIMI.....	43
4.2. DENEYLERDE KULLANILAN AŞINDIRICI MALZEME.....	49
4.3. DENEYLERDE KULLANILAN İŞ PARÇASI.....	50
4.4. İŞLEME PARAMETRELERİ	51
4.5. AŞINDIRICILI SU JETİ TEZGÂHI.....	53
4.6. TAM FAKTÖRİYEL (EŞLEŞMELİ) DENEY TASARIMI	55
4.7. KULLANILAN İSTATİSTİK PROGRAMI.....	59
4.8. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM CİHAZI	60
4.9. TALAŞ KALDIRMA ORANININ ÖLÇÜMÜ	61
4.10. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İLE GÖRÜNTÜ ANALİZLERİ VE ELEMENT DAĞILIM (EDS) ANALİZİ	62
4.11. MİKRO SERTLİK ANALİZLERİ	63
BÖLÜM 5	66
BULGULAR VE TARTIŞMA	66
5.1. YAPILAN ÇALIŞMALAR	66
5.2. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İSTATİSTİK ANALİZLER.....	67
5.3. TAM FAKTÖRİYEL TASARIM İSTATİSTİK ANALİZLERİ	71
5.4. ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN YAPILAN TAM FAKTÖRİYEL ANALİZ.....	71
5.4.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Yapılan Regresyon Analizi.....	74

Sayfa

5.4.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Geliştirilen Doğrusal Regresyon Denklemi Modelinin Uygunluk Kontrolü	75
5.4.3. İşleme Parametrelerinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisini Gösteren Yüzey Grafik Analizleri	77
5.5. İŞLEME PARAMETRELERİNİN ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ	87
5.5.1. Nozul İlerleme Miktarının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	87
5.5.2. EDS Analizi İle Element Tanımlama	90
5.5.3. Aşındırıcı Akış Oranının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	93
5.5.4. Torna Devrinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi.....	97
5.5.5. Nozul Yaklaşma Mesafesinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	98
5.5.6. Nozul Çapının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	102
5.6. TALAŞ KALDIRMA ORANI İÇİN YAPILAN TAM FAKTÖRİYEL ANALİZİ	106
5.6.1. Talaş Kaldırma Oranı İçin Yapılan Regresyon Analizi.....	108
5.6.2. Talaş Kaldırma Oranı İçin Geliştirilen Doğrusal Regresyon Denklemi Modelinin Uygunluk Kontrolü.....	109
5.6.3. İşleme Parametrelerinin Talaş Kaldırma Oranına Etkisini Gösteren Yüzey Grafik Analizleri	111
5.7. MİKRO SERTLİK ANALİZİ.....	120
5.8. PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU.....	123
BÖLÜM 6	124
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	124
KAYNAKLAR	128
ÖZGEÇMİŞ	136

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. ASJ tezgâhı ve tezgahı oluşturan donanımların gösterimi.....	6
Şekil 2.2. Aşındırıcılı su jetinin oluşumunu sağlayan sistemin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3. Doğrudan tahrikli pompa görüntüsü	7
Şekil 2.4. İntensifier tip ASJ pompa genel görünümü.....	8
Şekil 2.5. Aşındırıcılı tip nozul (kesme kafası) kesit görünüşü.....	9
Şekil 2.6. Aşındırıcı besleme ünitesi görünümü.....	10
Şekil 2.7. ASJ’de kullanılan aşındırıcıların mikro görüntüsü.	11
Şekil 2.8. Polimer katkılı ve katkısız ASJ akışının açık atmosferdeki görüntüleri.	12
Şekil 3.1. Beş farklı nozul ilerleme miktarı kullanılarak yapılan ASJT işleminde pompa basıncı artışının talaş kaldırma oranına etkisini gösteren grafik.....	17
Şekil 3.2. Beş farklı pompa basıncı kullanılarak yapılan ASJT işleminde aşındırıcı akış oranı artışının talaş kaldırma oranına etkisini gösteren grafik.....	18
Şekil 3.3. Alın tornalama işlemi görüntüsü, Alın tornalama işlemi sonrasında alın merkezinde oluşan dalgalılık görüntüsü.....	18
Şekil 3.4. Farklı nozul ilerleme miktarlarında oluşan makro yüzey görüntüleri.	19
Şekil 3.5. Silindirik cam malzemenin ASJ ile tormalanması görüntüsü.	20
Şekil 3.6. Pompa basıncının yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığına etkisi grafiği görüntüsü.	21
Şekil 3.7. ASJT deney düzeneği ve ASJ ile işleme anı görüntüsü.	21
Şekil 3.8. ASJT ile işlemenin şematik gösterimi.....	22
Şekil 3.9. Klasik tornalama esnasında kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaş ve tane sınırında oluşan kırılmaların SEM görüntüsü.....	23
Şekil 3.10. Kumaş taşlama diski tornalama deney düzeneği görüntüsü.....	23
Şekil 3.11. ASJ’nin iş parçasına çarpma açısı görüntüsü.....	24
Şekil 3.12. ASJ tornalama deney düzeneği görüntüsü.	25
Şekil 3.13. Deneysel sonuçların Manu modeli ile karşılaştırılması görüntüsü.	26

Şekil 3.14. ASJ tezgahı için imalatı gerçekleştirilen torna deney düzeneği görüntüsü.....	27
Şekil 3.15. Bakır alaşımının ASJ ile tornalanması anı görüntüsü.	28
Şekil 3.16. Düşük yoğunluklu polietilen malzemenin klasik torna ile işlenmiş, ASJT ile işlenmiş görüntüsü.	29
Şekil 3.17. Torna devri ve nozul ilerleme miktarının talaş kaldırma hacmine etkisi grafik görüntüsü.....	29
Şekil 3.18. ASJT ile işleme koşulları teorik gösterimi, Titanyum malzemenin ASJT ile işlenmesi anı görüntüsü.....	30
Şekil 3.19. ASJ ile tornalamada kullanılan deney düzeneği görüntüsü.	31
Şekil 3.20. ASJT işleme teknikleri: Ofset mod Radyal mod işleme.	32
Şekil 3.21. ASJT’da kullanılan tornalama deney düzeneği görüntüsü.....	32
Şekil 3.22. AISI 1050 çelik malzemenin ASJT ile işlenmesinde işleme parametrelerini kesme derinliğine etkisinde deneysel ve tahminsel kesme derinliği değerlerinin karşılaştırılması grafiği.....	34
Şekil 3.23. Aşındırıcı akış oranının kesme derinliğine etkisi grafik görüntüsü.	35
Şekil 3.24 Aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi grafik görüntüsü.....	36
Şekil 3.25. Pompa basıncının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi grafik görüntüsü.....	37
Şekil 3.26. ASJ ve CO2 lazer ile işlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi görüntüsü.....	38
Şekil 3.27. Alüminyum 6061 T6 malzemesinden CO2 lazer, aşındırıcı su jeti ve CNC freze imalat yöntemlerini kullanarak hazırlanan çekme testi numuneleri görüntüsü.....	40
Şekil 4.1. Model 1 tip su jeti tornalama düzeneği gösterimi.....	44
Şekil 4.2. Motor devri için kullanılan ayarlanabilir elektronik kontrol devresi görünümü	44
Şekil 4.3. Model 1 tip torna düzeneğinin ASJ tezgahında deneme anı görüntüsü.....	45
Şekil 4.4. Model 2 tip tek eksenli kaplinli torna düzeneği gösterimi	46
Şekil 4.5. Üç boyutlu tasarlanan Model 3 hibrit torna deney düzeneği görüntüsü.....	47
Şekil 4.6. İmalatı gerçekleştirilen Model 3 hibrit torna deney düzeneği görünümü.	47
Şekil 4.7. Lazer devir ölçer, Altivar 12 (220-230 V) elektrik motoru hız ayar cihazı görünümü.....	48
Şekil 4.8. Torna aynası dönüş hızı kontrollerinin yapım sürecinin görüntüsü.....	48

Sayfa

Şekil 4.9. 120 Mesh garnet aşındırıcının makro görünümü.	50
Şekil 4.10. AISI 1050 çeliğinden hazırlanmış deney numune görüntüsü.	50
Şekil 4.11. Nozul yaklaşma mesafesinin görünümü.	52
Şekil 4.12. İş parçasının önden görünümünde nozul yaklaşma mesafesi konumları görünümü.	52
Şekil 4.13. AISI 1050 malzemenin ASJT ile işlenmesinde, iş parçasının dönüş yönünün ASJ ile zıt yönlü olmasının durumunda iş parçası yüzeyinde meydana gelen yüzey bozuklukları görüntüsü.	53
Şekil 4.14. Deneylerin yapıldığı aşındırıcılı su jeti tezgâhı genel görüntüsü.	53
Şekil 4.15. KMT tipi intensifier pompa görüntüsü.	54
Şekil 4.16. KMT intensifier pompalı aşındırıcılı su jeti basınç ünitesi dış görüntüsü.	54
Şekil 4.17. Minitab 17.0 paket programı ile tam faktöriyel analizin oluşturulma süreci görüntüsü.	60
Şekil 4.18. Mitutoyo (SJ-300) masaüstü sütunlu yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görüntüsü.	60
Şekil 4.19. ASJT ile işlenen AISI 1050 çeliğinin yüzey pürüzlülük ölçümü gösterimi.	61
Şekil 4.20. Mikro görüntü ve element dağılımı analizinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı görüntüsü.	63
Şekil 4.21. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliğinden çıkartılan numunelerden mikro sertlik ölçüm anı görüntüsü.	64
Şekil 4.22. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği üzerinden alınan numuneler görüntüsü.	64
Şekil 4.23. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği numuneleri üzerinden alınan mikro sertlik ölçüm bölgeleri gösterimi.	65
Şekil 5.1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için standardize edilmiş etkilerin normal dağılımı	72
Şekil 5.2. Ana parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin pareto analiz grafiği.	74
Şekil 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen matematik modelin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması.	76
Şekil 5.4. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için doğrusal regresyon denklemi hatalarının normal olasılık eğrisi.	76
Şekil 5.5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için uydurulan değerlerin artıklara etkisini gösteren grafik görünümü.	77

Şekil 5.6. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (AAO 50 g/dak, NYM 2 mm, TD 500 dev/dak).....	78
Şekil 5.7. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (AAO 50 g/dak, NÇ 0,7 mm, TD 500 dev/dak).....	79
Şekil 5.8. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul çapı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, AAO 500 dev/dak)	80
Şekil 5.9. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul çapı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, TD 500 dev/dak).....	81
Şekil 5.10. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm).....	82
Şekil 5.11 AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm)	83
Şekil 5.12. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (TD 500 dev/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm)	84
Şekil 5.13. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ve nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 500 dev/dak, NÇ 0,7 mm).....	85
Şekil 5.14. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul yaklaşma mesafesi ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak).....	86
Şekil 5.15. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak)	87

Şekil 5.16. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak, NÇ 0,7 mm).....	88
Şekil 5.17. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile farklı nozul ilerleme değerlerinde işlenmesi sonucu iş parçası yüzeyinde oluşan çizik açılarının görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak, NÇ 0,7 mm).....	89
Şekil 5.18. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde kullanılan aşındırıcı parçacığın (120 mesh garnet) yapmış olduğu mikro iz 1500x büyütme görüntüsü (NYM 18 mm, TD 500 dev/dak, AAO 50 g/dak, NÇ 1,3 mm NİM 45 mm/dak).....	90
Şekil 5.19. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde 1 ve 2 nolu nesnelerin EDS analizi için 3000x büyütme SEM görüntüsü (NYM 18 mm, TD 500 dev/dak, AAO 50 g/dak, NÇ 1,3 mm NİM 45 mm/dak)	91
Şekil 5.20. 1 nolu aşındırıcı numune üzerinde yapılan EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.....	92
Şekil 5.21. 2 nolu AISI 1050 çeliğine ait EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.....	92
Şekil 5.22. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, nozul ilerleme miktarı (5, 25 ve 45 mm/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütme SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, AAO 50 g/dak, TD 500 dev/dak ve NYM 2 mm).....	93
Şekil 5.23. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü, (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak ve NYM 2 mm).....	94
Şekil 5.24. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 350 g/dak) parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren görüntü (NÇ 0,7 mm, TD 500 dev/dak ve NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak).....	95
Şekil 5.25. Laminar akış, Türbülanslı akış modelleri görüntüsü.....	96
Şekil 5.26. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde farklı aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 350 g/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütme SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak ve NYM 2 mm).	96
Şekil 5.27. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde torna devri değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak ve NYM 2 mm).	97

Şekil 5.28. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde torna devri (500, 1500 ve 2500 dev/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütme SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve NYM 2 mm).....	98
Şekil 5.29. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak ve TD 2500 dev/dak).....	99
Şekil 5.30. ASJ işleminde nozul yaklaşma mesafesinin kerf oluşumuna etkisi.....	100
Şekil 5.31. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesinin kerf oluşumuna etkisini gösteren görüntü.....	100
Şekil 5.32. ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesine bağlı olarak oluşan pah ve radius oluşumu gösterimi.	101
Şekil 5.33. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde 18 mm nozul yaklaşma mesafesinde iş parçası yüzeyinde oluşan pah ve radius oluşumu görüntüsü.	101
Şekil 5.34. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesi (2, 10 ve 18 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150 x büyütme SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak)	102
Şekil 5.35. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak, NYM 2 mm ve TD 2500 dev/dak).....	103
Şekil 5.36. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapı (0,7 ve 1,3 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 300x büyütme SEM görüntüsü (NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak)	104
Şekil 5.37. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapı (1,3 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 300x büyütme SEM görüntüsü (NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak).....	104
Şekil 5.38. ASJT işleminde ASJ'nin iş parçasını döndürülmediği durumda kesme durumu görüntüsü.	105
Şekil 5.39. Yüzeyde oluşan çukurların oluşum senaryosu gösterimi.....	106
Şekil 5.40. Talaş kaldırma oranı için parametrelerin normal olasılık grafiği.....	106
Şekil 5.41. İşleme parametrelerin talaş kaldırma oranı üzerindeki etkilerinin pareto analiz grafiği.....	108
Şekil 5.42. Deneysel ve geliştirilen tahmini verilerin dağılımını gösteren grafik görüntüsü.....	110
Şekil 5.43. Talaş kaldırma oranı için normal olasılık eğrisi görüntüsü.....	110

Şekil 5.44. Talaş kaldırma oranı için artık değerler grafiği.....	111
Şekil 5.45. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde torna devri ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	112
Şekil 5.46. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, NYM 18 mm).....	113
Şekil 5.47. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, TD 2500 dev/dak)	114
Şekil 5.48. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NYM 18 mm, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	115
Şekil 5.49. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ile nozul yaklaşma mesafesinin parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (TD 2500 dev/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	116
Şekil 5.50. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde Torna devri ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	117
Şekil 5.51. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul yaklaşma mesafesi ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak)	118
Şekil 5.52. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde T aşındırıcı akış oranı ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	119
Şekil 5.53. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde Torna devri ile nozul yaklaşma mesafesinin parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).....	120
Şekil 5.54. AISI 1050 ASJT ile işlenmesinde sertlik değişim grafiği.....	121
Şekil 5.55. ASJ işleminde işlenen yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon oluşumgörüntüsü	122

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Aşındırıcılı su jetinde kullanılan aşındırıcı türleri.....	11
Çizelge 2.2. ASJ ile işlemede kullanılan parametreler.....	13
Çizelge 4.1. 120 Mesh Aşındırıcı garnetin kimyasal özellikleri.....	49
Çizelge 4.2. 120 Mesh aşındırıcı garnetin mekanik özellikleri.....	49
Çizelge 4.3. Deney numunesinin (AISI 1050) mekanik özellikleri.....	51
Çizelge 4.4. Deney numunesinin (AISI 1050) kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	51
Çizelge 4.5. ASJT işleminde kullanılan parametreler ve seviyeleri.....	51
Çizelge 4.6. KMT basınç ünitesi teknik özellikleri.....	55
Çizelge 4.7. Tam faktöriyel deney düzeni.....	55
Çizelge 4.8. Mitutoyo marka (SJ-300) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri.....	61
Çizelge 4.9. SEM görüntüsü alınan deney no ve özellikleri.....	63
Çizelge 5.1. Tam faktöriyel deney sırası ve deney sonuçları.....	67
Çizelge 5.2. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analiz sonuç tablosu.....	73
Çizelge 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için doğrusal regresyon denklem katsayıları.....	75
Çizelge 5.4. Talaş kaldırma oranı için yapılan varyans analiz sonuçları tablosu. ..	107
Çizelge 5.5. Talaş kaldırma oranı için doğrusal regresyon analizine ait katsayı tablosu.....	109
Çizelge 5.6. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde mikro sertlik ölçümü yapılan numunelerin referans parametre değerleri ve mikro sertlik değerleri.....	121
Çizelge 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri ve talaş kaldırma oranının en yüksek değeri için ASJT parametrelerinin optimum değerleri tablosu.....	123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

°C	: Derece santigrat
V	: Volt
KW	: Kilowatt
CO ₂	: Karbon dioksit
W	: Watt
M _a	: Aşındırıcı akış oranı
µm	: Mikron metre
°	: Derece
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
N ₂	: Nitrojen gazı
Cu	: Bakır
Cr	: Krom
Zr	: Zirkonyum
L ₁₈	: Taguchi L ₁₈ deney düzeni
L ₉	: Taguchi L ₉ deney düzeni
T4	: Derece
P _L	: Lazer gücü (W)
Ø	: Çap (mm)
N	: Tam faktöriyel analizde toplam deney sayısı
n	: Tam faktöriyel analizde toplam seviye sayısı
k	: Tam faktöriyel analizde toplam parametre sayısı
SiO ₂	: Silisyum oksit
MgO	: Magnezyum oksit
Fe ₂ O ₃	: Demir 3 oksit
CaO	: Kalsiyum oksit

Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
MnO	: Mangan oksit
%	: Yüzde oran
mN	: mili Newton
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü (µm)
Rz	: Yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki dikey mesafe
Rmax	: Yüzey pürüzlülüğünün maksimum değeri
D _i	: Tornalama öncesi çapı
D _{i+1}	: Tornalama sonrası çapı
h	: Boyuna tornalanan yüzey mesafesi

KISALTMALAR

AISI	: American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASJ	: Aşındırıcılı Su Jeti
AWJ	: Abrasive Water Jet
ASJT	: Aşındırıcılı Su Jeti ile Tornalama
AWJT	: Abrasive Water Jet Turning
MPa	: Mega Paskal
TKO	: Talaş Kaldırma Oranı (mm ³ /dak)
NİM	: Nozul İlerleme Miktarı (mm/dak)
NYM	: Nozul Yaklaşma Mesafesi (mm)
TD	: Torna Devri (dev/dak)
NÇ	: Nozul Çapı (mm)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	: Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi)
AA	: Alüminyum Alaşımı (Aluminum Alloy)
AAO	: Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)
UYB	: Ultra Yüksek Basınç
ASTM	: American Society For Testing Materials (Amerikan Malzeme Test Derneği)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üretimin verimliliğini ve hassasiyetini artırabilmek amacıyla günümüze kadar farklı geleneksel olmayan işleme teknolojileri geliştirilmiştir. Özellikle son yıllarda elektronik, bilgisayar, havacılık ve uzay endüstrilerinin ürün taleplerine olan beklentileri karşılamak için geleneksel olmayan imalat yöntemleri büyük bir önem kazanmıştır [1-5].

Geleneksel imalat yöntemlerinde mekanik enerji kullanılırken, geleneksel olmayan imalat yöntemlerinde ise mekanik enerji, elektrokimyasal enerji, kimyasal enerji ve ısı enerjisi kullanılmaktadır [2-4]. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden bazıları şunlardır;

- Elektro Erozyon (Dalma Erozyon) Yöntemi
- Tel Erozyon Yöntemi
- Kimyasal İşleme
- Elektro Kimyasal İşleme
- Ultrasonik İşleme
- Lazer Kesim
- Su Jeti ile İşleme
- Aşındırıcılı Su Jeti ile İşleme

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden olan Aşındırıcılı Su Jeti ile işleme (ASJ) soğuk işleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır [2-4]. ASJ ile işleme, iş parçası üzerinde herhangi bir ısı etki oluşturmadan işleme yapabilmesi nedeniyle son yıllarda ilgi görmeye başlamıştır [1-7]. ASJ ile işlemede, yüksek mukavemetli, korozyon dirençli mühendislik malzemeleri ile kırılğan malzemeler rahatlıkla işlenebilmektedir [5-8]. ASJ ile işleme ilgili çok sayıda araştırma ve geliştirme

çalışmaları yapılmış olmakla beraber günümüzde hala geliştirilme aşamasındadır [2-6].

ASJ işleme yöntemi geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar; mikro işleme yapılabilme, işleme esnasında işleme bölgesinde ısıl etki oluşturmaması, iş parçası üzerinde çapak oluşturmaması, toz, kimyasal sızıntı yada gazın oluşmaması v.b. [1-10].

ASJ ile frezeleme, kesme, delme ve tornalama işlemleri yapılabilmektedir [7-8]. ASJ ile tornalama işleminin yapılmasına Aşındırıcılı Su Jeti ile Tornalama (ASJT) denilmektedir. ASJT işlemi geleneksel tornalama ile karşılaştırıldığında üstünlükleri bulunmaktadır [1-5].

Bu çalışmada; ASJT ile işleme yapabilmek için ASJ tezgâhı çalışma şartlarına uygun özel tornalama düzeneği geliştirilmiştir. Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen deney düzeneğinde iki farklı nozul çapı ile üç farklı nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi ve torna devri kullanılarak AISI 1050 çeliğinin tornalama işlemi sonrasında işleme parametrelerinin iş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranları değerleri tam faktöriyel istatistik analizler kullanılarak (Anova, veri uygunluk analizi, pareto analizi regresyon ve üç boyutlu grafik analizi) grafiklere aktarılmış ve bu grafikler yorumlanmıştır.

Çalışma genel olarak, aşındırıcılı su jeti ile işleme yöntemi, konuyla ilgili çalışmaları içeren literatür araştırması, deney düzeneği, kullanılan aşındırıcı, işleme parametreleri ve ASJ tezgah ile malzeme çiftlerini tanımlayan materyal ve metod, denemeler sonucu elde edilen bulguları önceki çalışmalar ile mukayese eden bulgular ve tartışma, son olarak sonuç ve öneriler olmak üzere altı bölümden meydana gelmektedir.

BÖLÜM 2

AŞINDIRICILI SU JETİ İLE İŞLEME YÖNTEMİ

2.1. GİRİŞ

Son yıllarda gerçekleşen teknolojik gelişmelere bağlı olarak sanayinin her alanında sağlanan ilerlemeler, imalat sektöründe de bazı yenilikçi (inovatif) adımların atılmasını gerektirmiştir [1-3]. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak imalat sektöründe gelişim gösteren aşındırıcı su jeti (ASJ) teknolojisi metal kesme işleminde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [2-4]. ASJ ile kesme; suyun yüksek basınca çıkartılarak malzeme üzerinden aşındırma (erozyon) ve kesme işlemi yapma esasına dayanmaktadır [3-5]. Yüksek basınçlarda sıkışan su, dar bir haznedan geçirildiğinde Bernoulli denklemi ile ifade edilen yüksek düzeyde bir kinetik enerjiye sahip olabilmektedir [4-6]. Yüksek düzeyde enerjiye sahip olan su, yüksek hızlara ulaşarak malzeme üzerinde erozyon ve kesme yapmaktadır [5-8].

Su jeti (SJ); aşındırıcı su jeti ve aşındırıcısız olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [6]. ASJ, SJ'ne aşındırıcı malzeme katılması ile elde edilmektedir [7-10]. SJ ile ilgili çalışmalar 1950'li yıllarda başlamıştır. ASJ ile çalışmalar ise 1980'lerin başlarında başlamıştır. ASJ ile ilgili olan çalışmalar genellikle metal endüstrisinde yaygınlaşmıştır [9-13].

Metal endüstrisinde ASJ'nin kullanılmaya başlaması ile donanımsal ve yapısal anlamda birçok teknolojik ve sistemsel gelişme yaşanmıştır [10-12]. Bu gelişmeler ile ASJ, özellikle metal endüstrisinde, işlenmesi zor malzemelerin işlenmesinde tercih edilir olmuştur [11-13].

Tasarımlara bağlı olarak performansının yükselmesi, yeni çalışma alanlarını meydana getirerek sektörel anlamda ASJ kullanımını arttırmıştır [10-13]. Çoklu

kesme kafası kullanımı ile malzeme işleme süreleri azaltılmış ve verimlilik yükseltilmiştir [5-9].

2.2. AŞINDIRICILI SU JETİ

ASJ ile işleme, geleneksel imalat yöntemleriyle işlemenin mümkün olmadığı durumlarda kullanılan bir tekniktir [5-10]. Prensip olarak ASJ ile işleme, yüksek basınçlı su ile ince taneli aşındırıcı malzeme karışımının hedef iş parçasına çarptırılması etkisiyle parça üzerinde erozyon oluşturulması esasına dayanmaktadır [10-14]. İş parçası üzerinde erozyon yaparak işleme yapan su ve aşındırıcının karışımı olan jetin temelinde mekanik enerji yer almaktadır [12-15].

ASJ’de yaygın olarak kullanılan su basıncı ~ 400 MPa civarındadır. Aşındırıcı hızı ise ~ 450 - 720 m/s aralığında değişim göstermektedir [12-16]. İş parçası üzerine saniyeler mertebesinde yüksek hızlarda çarpan su ve aşındırıcı parçacıklar, atomlar arasındaki bağ enerjisinin kopmasına neden olarak erozyon veya kesme işlemi etkisi yapmaktadır [16-19].

Düşük mukavemetli; tahta, plastik gibi malzemelerin kesimi için SJ yeterli olurken, metal gibi mukavemeti yüksek malzemelerin kesiminde ise ASJ kullanılmaktadır [15-17].

2.2.1. Aşındırıcılı Su Jetinin Tarihçesi

Genel olarak su ile kesme işlemi, Çinlilerin kullandığı “damlayan su kayayı işler” deyiminden hareketle ortaya çıkmıştır [1-10]. Cisim üzerinde bir noktaya sürekli olarak akan su damlacıklarının cisim üzerinde oluşturduğu deformatif etki (erozyon) bilim insanlarının dikkatini çekmiştir.

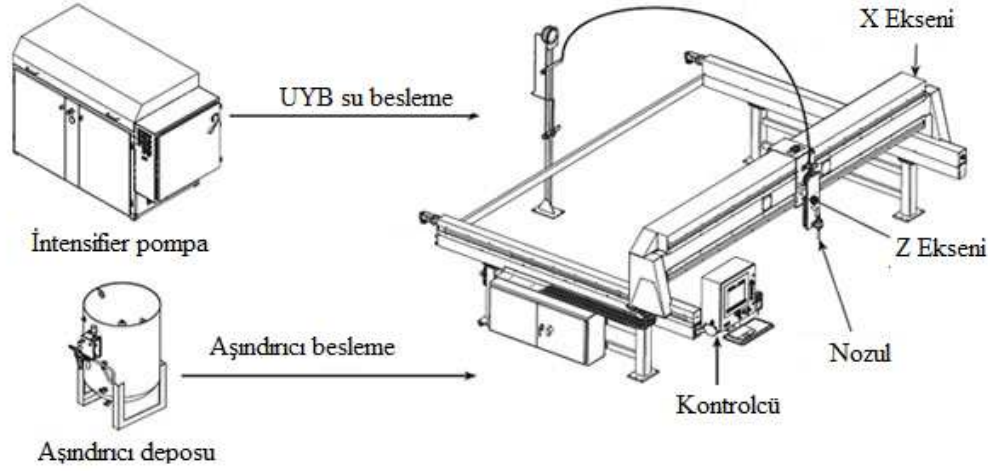
Yüksek basınçlı suyun tarihsel seyrine bakıldığında çok eski yıllara dayanmaktadır. SJ ilk olarak madencilikte kullanılmıştır. Özellikle 20. yy.’ın ilk yarısında, yüksek basınçlı suyun, kömür, taş ve toprağın birbirinden ayrıştırılması işlemlerinde kullanıldığı görülmektedir [15-19]. Sonraki dönemlerde özellikle 1950’lerin

sonlarına doğru, yüksek basınçlı suyun kullanım alanı içerisinde arazi ve sanayi uygulamaları da girmiş, bu anlamda talaşlı imalat, delik delme, tünel açma ve hidrolik kazı alanlarında da çalışmalar yapılmıştır [14-19]. SJ'nin ilk olarak kesme proseslerinde kullanımı Dr. Norman Franz tarafından 1960 yılında gerçekleştirilmiştir [17-19]. İleriki yıllarda su jetine aşındırıcı özellikli maddeler eklenmeye çalışılmış, aşındırıcı su karışımının cisimler üzerinde tahrip etme özelliklerinin daha yüksek olduğu fark edilmiştir [16-18]. İlk uygulamaları Dr. Mohamed Hashish 1979 yılında yapmıştır. Dr. Hashish su jetine aşındırıcı özellikli ve zımpara kâğıdında kullanılan aşındırıcı maddeyi eklemeyi başarmış ve ilk ASJ'nin temellerini atmıştır [18-20].

2000'li yıllara gelindiğinde su basıncı seviyeleri (600 - 650 MPa) olan ultra yüksek basınç değerli ASJ sistemleri tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu tür yüksek kesme ve işleme kapasiteli ASJ'ler endüstriyel sektörde geniş uygulama alanı bulmaya başlamıştır [15-21].

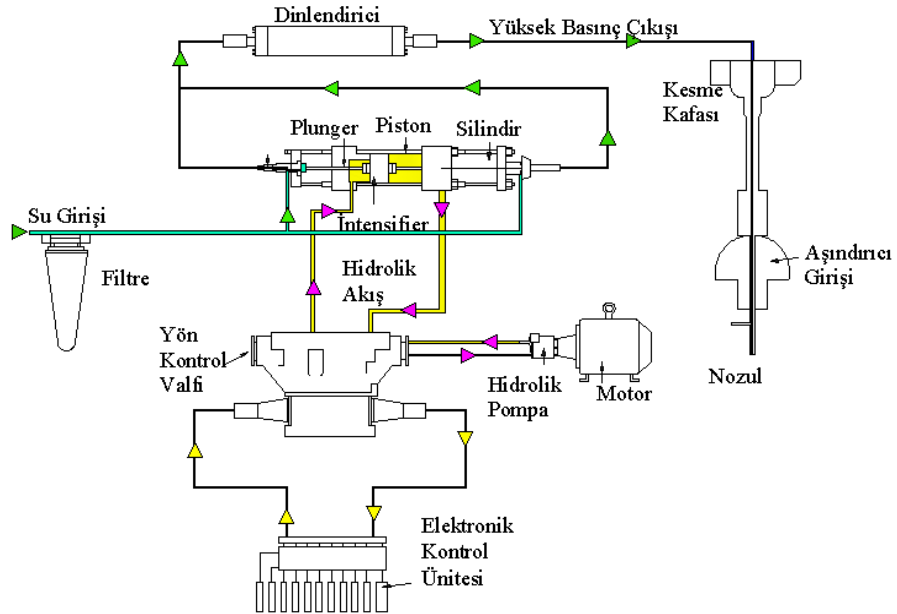
2.2.2. Aşındırıcı Su Jeti Tezgâhı

ASJ'nin işleme esnasında sürekliliği, hassasiyeti ve tekrarlanabilirlik özellikleri nedeniyle seri üretim otomasyonuna çok uygun sistemlerdir [22]. Bu nedenle bilgisayar destekli imalat sistemlerinde geniş bir uygulama alanı bulmaktadır [22]. Klasik bir ASJ tezgâhı ve tezgâhı oluşturan donanımlar Şekil 2.1'de gösterilmiştir [15-21].



Şekil 2.1. ASJ tezgâhı ve tezgâhı oluşturan donanımların gösterimi [22].

Bir ASJ tezgâhı yapısal anlamda genel olarak Ultra Yüksek Basıncılı (UYB) sistemi, CNC tezgah ve kontrol ekranı, aşındırıcı besleme sistemi ve diğer ara bağlantı elemanlarından oluşmaktadır [23-25]. ASJ’de jetin oluşum sürecinin şematik gösterimi Şekil 2.2’de verilmiştir.



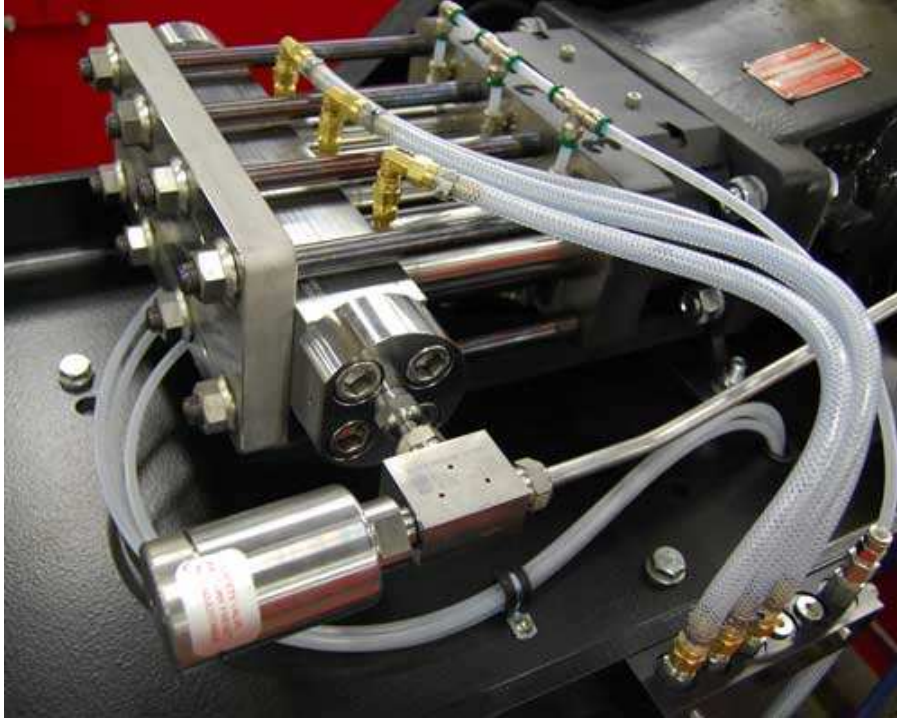
Şekil 2.2. Aşındırıcılı su jetinin oluşumunu sağlayan sistemin şematik gösterimi [23].

2.2.3. ASJ'de Kullanılan Pompalar

ASJ uygulamalarında fonksiyonel olarak iki çeşit pompa kullanılmaktadır. Bunlar, doğrudan tahrikli pompalar ve hızlandırıcı esaslı (intensifier) pompalardır [23-24].

2.2.3.1. Doğrudan Tahrikli Pompalar

Doğrudan tahrikli pompa, pistonlarının gücünü doğrudan elektrik motoru milinden alan bir pompa çeşididir [23-24]. Şekil 2.3'te doğrudan tahrikli bir pompa görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.3. Doğrudan tahrikli pompa görüntüsü [24].

Doğrudan tahrikli pompalar genellikle üç silindir ve pistondan meydana gelmiştir. Pompa içerisinde yer alan her bir silindirin içine düşük basınçlı su alınmakta ve su basıncı yaklaşık olarak 300 MPa değeri seviyelerine çıkabilmektedir [23,24]. Bu tip pompalar en fazla 300 MPa istenilmesi durumunda tercih edilmektedir [23,24].

Doğrudan tahrikli pompaların en büyük avantajı basınç dalgalanmalarının düşük olmasıdır. Diğer önemli avantajı ise düşük çalışma basınçları nedeniyle bakım gereksinimlerinin az olmasıdır [23,24].

2.2.3.2. Hızlandırıcı Esaslı (İntensifier) Pompa

İntensifier pompalar, yüksek basınçlı su jetini elde etmek amacıyla basınç yükseltme esasını kullanan pompalardır [25]. Şekil 2.4'te intensifier tipi bir pompa gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. İntensifier tip ASJ pompa genel görünümü [25].

İntensifier sistemler, hidrolik yağ ve su çevrimlerini içermektedir. Bu sistemde, hidrolik yağ basıncı ile su basıncının yükseltilmesi sistemin ana felsefesini oluşturmaktadır [25].

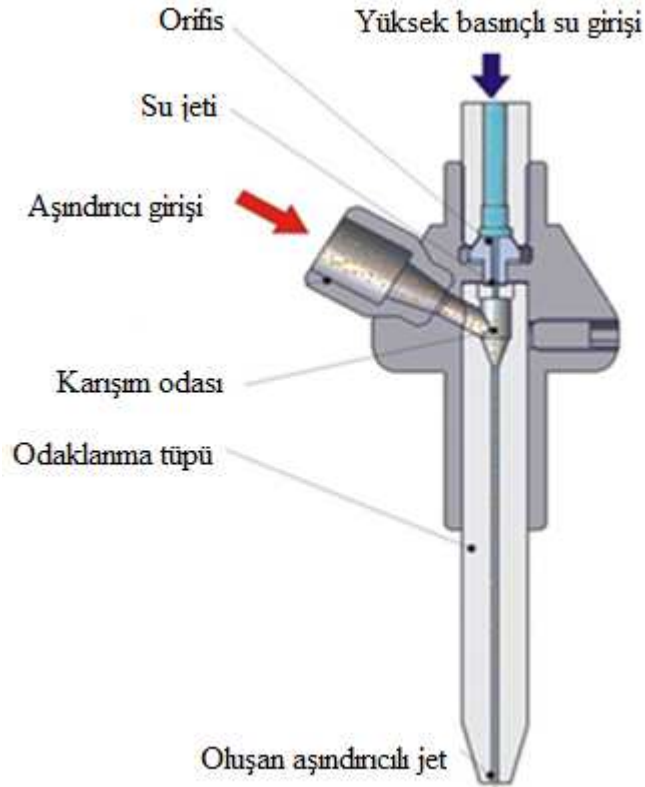
Bu sistemlerde, su basıncının yükseltilmesi, ünite içerisinde birbirine merkezden bağlantılı farklı yarıçaplara sahip silindirler aracılığıyla oluşturulmaktadır [25].

Sistemde, basınç yükseltmek için kullanılan silindir içerisindeki pistonun hareketinden kaynaklı su basıncında ani düşüşler olmaktadır. Su basıncındaki düşüşü

önlemek amacıyla sisteme bir dinlendirici (attenuator) yerleştirilir. Dinlendiricinin görevi, basınç değişimlerini minimuma indirmek ve sisteme sürekli yüksek basınçta su verilmesini sağlamaktır [25,26].

2.2.4. Aşındırıcı Su Jeti Nozulları

ASJ tezgâhlarında yaygın bir biçimde kullanılan aşındırıcı tip nozula ait kesit görünüşü Şekil 2.5’de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Aşındırıcı tip nozul (kesme kafası) kesit görünüşü [26].

Şekil 2.5’de Aşındırıcı tip nozul (kesme kafası) üzerinde, yüksek basınçlı su girişi, orifis, aşındırıcı malzeme girişi, karışım odası ve odaklanma tüpü yer almaktadır [27-30].

ASJ ile işlemede, prensip olarak yüksek basınçlı su, orifisten geçtikten sonra SJ akımı meydana getirmektedir [27-30]. Meydana gelen SJ akımı bir vakum

oluşturarak aşındırıcı malzemeyi aşındırıcı besleme ünitesinden vakum kuvveti aracılığıyla çekmekte ve malzeme karışımı oluşturulmaktadır [27-29]. Karışım odasında su ile aşındırıcı karışarak ASJ oluşur. Oluşan ASJ, kazanmış olduğu kinetik enerji ile nozul ucundan dış ortama çıkmaktadır [30].

2.2.5. Aşındırıcı Besleme Ünitesi

Aşındırıcı besleme ünitesi (Şekil 2.6), su jetine, aşındırıcı malzemeleri besleyen donanımdır [31].



Şekil 2.6. Aşındırıcı besleme ünitesi görünümü [31].

2.2.6. Aşındırıcı Parçacıklar

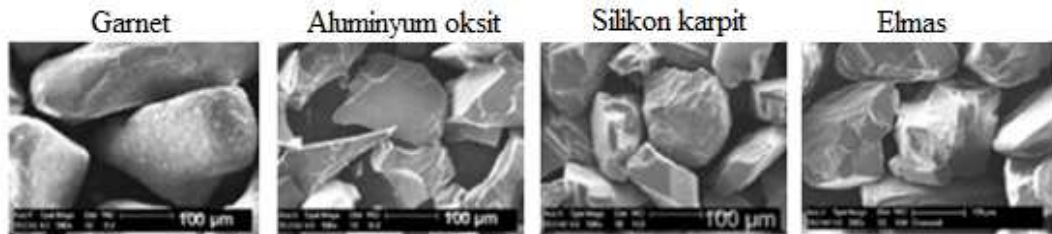
Aşındırıcı özellikli malzemelerden olan zımpara tozu yaygın olarak kullanılmakta iken yerini silikon karbür, alüminyum oksit, garnet veya diğer seramik aşındırıcılara bırakmıştır [32-42]. Doğal aşındırıcılar genelde, akarsu yataklarından elde

edilmektedir. Bunun yanı sıra aşındırıcı malzemeler bazı sert kaya türlerinden de elde edilebilmektedir. Öğütme proseslerinden geçirilerek keskin köşeli düzensiz şekilli parçacıklar haline dönüştürülmektedir [32-42]. ASJ yaygın olarak kullanılan aşındırıcı türleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Aşındırıcılı su jetinde kullanılan aşındırıcı türleri [32-42].

Malzeme	Sertlik Derecesi	
	Mohs	Knoop
Alüminyum oksit	8 - 9	2100
Bakır cürufu	-	1050
garnet (grena) taşı	7,5	1350
Cam kırığı	5,5	~500
Olivin	5,5	1100
Silikon karbür	9,15	2500
Cam (silis) kumu	-	700

Aşındırıcı parçacıklar mikron boyutlarında olup birimi mesh olarak ifade edilmektedir. Aşındırıcı boyutunun ASJ uygulamalarında önemi büyüktür. Aşındırıcıların boyutundaki artış, malzeme üzerinde kaldırılan talaş miktarını ve kesme derinliğini arttırmaktadır. Literatürde kullanılan aşındırıcı boyutları 20-200 Mesh aralığındadır [32-44]. ASJ’de kullanılan aşındırıcılarından bazılarının ait görüntüleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



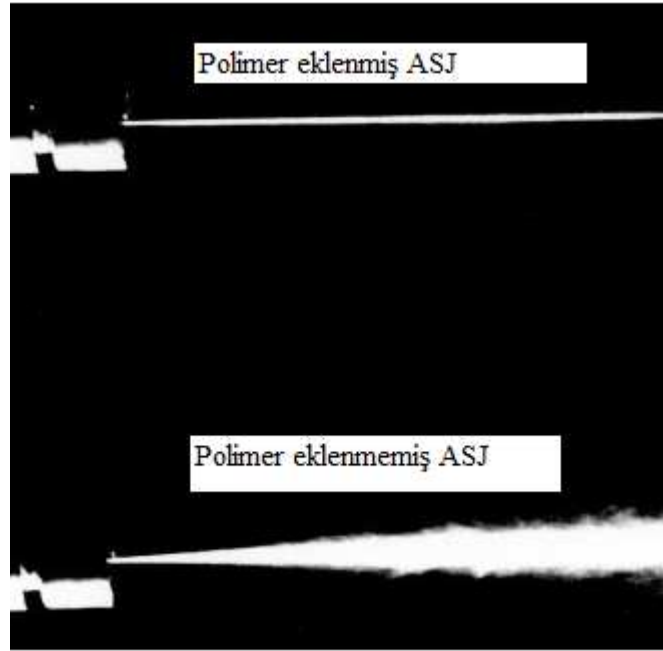
Şekil 2.7. ASJ’de kullanılan aşındırıcıların mikro görüntüsü [44].

ASJ’de en yaygın kullanılan aşındırıcı çeşidi garnet kumudur. Garnet kırmızımsı pembe bir renge sahip olup erime noktası 1315 °C’dir. Kimyasal olarak suda

çözünmez ve kokusuzdur. Yanıcı değildir, kararlıdır ve kimyasal uyumsuzluk veya tehlikeli ayrışma ürünleri içermemektedir [32-45].

2.2.7. Aşındırıcı Su Jetinde Kullanılan Su Kalitesi

Gerek sünek, gerekse gevrek malzemelerin kesim ve işlenmesi süreçlerinde aşındırıcının önemli bir rolü bulunmaktadır. Ancak, aşındırıcının yanında ASJ'nin ana elemanı olan suyun kalitesi çok önemlidir. Su, genelde iki tip olarak kullanılmaktadır. Birincisi şebeke suyu, ikincisi ise şebeke suyu içerisine polimer eklenmiş sudur. Polimer, suyun hidrojen molekülleri arasındaki bağı kuvvetlendirmektedir. Polimer katkılı su kullanılması durumunda kesme işlemi esnasında aşındırıcı su jetinin nozul çıkışında dağılması önlenir ve daha laminar akış sağlanır [46-50]. Polimer eklenmiş ve eklenmemiş ASJ'nin açık atmosfer ortamında görüntüleri Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Polimer katkılı ve katkısız ASJ akışının açık atmosferdeki görüntüleri [50].

2.2.8. Aşındırıcı Su Jeti ile İşlemede Kullanılan Parametreler

ASJ ile işleme yönteminde, kontrol edilebilir değişken parametreye gereksinim duyulmaktadır [36,37,41-43]. ASJ’de kullanılan parametreler Çizelge 2.2’de kategorize edilerek verilmiştir.

Çizelge 2.2. ASJ ile işlemede kullanılan parametreler [36,37,41-43].

Parametre türü	Değişkenler
Kesme	Nozul mesafesi, nozul ilerleme hızı ve çarpma açısı
Hidrolik	Nozul çapı, nozul uzunluğu, orifis çapı, pompa basıncı ve polimer katkı maddeleri
Aşındırıcı	Akış oranı, aşındırıcı boyutları, aşındırıcının partikül şekli ile partikül boyut dağılımı ve aşındırıcı partikül sertliği
Malzeme	Kesilecek ya da işlenecek malzemenin sünek ya da gevrek olması, malzemenin sertlik mukavemet değeri

Çizelge 2.2’de verilen parametreler malzemeye bağlı olarak ASJ ile işleme yönteminin kesme ve işleme kabiliyetini belirleyen ve aynı zamanda performansı üzerinde etki eden parametrelerdir [36,37,41-43].

2.2.9. Aşındırıcı Su Jetinin Kullanıldığı Alanlar

ASJ yöntemi, birçok sektörel alanda, özellikle, havacılık ve uzay sanayinde kullanılmaktadır [50-56]. Havacılık ve uzay sanayinin yanı sıra ASJ fabrika uygulamalarında özellikle “kesilmesi zor” malzemelerin kesiminde ve şekillendirilmesinde kullanılmaktadır.

Aşındırıcı su jetinin kullanım alanları;

- İşlenmesi zor malzemelerin kesilmesinde,
- Frezeleme ve üç boyutlu (3D) şekillendirmede,
- Tornalama işleminin gerçekleştirilmesinde,

- Delme işleminin gerçekleştirilmesinde,
- Temizleme işleminin gerçekleştirilmesinde kullanılmaktadır [6-16,18-22,51-69].

Sektörel olarak ise ASJ aşağıda verilen alanlarda kullanılmaktadır [51-69].

- Metal işleme sanayi
- Elektrik - elektronik sanayi
- Plastik sanayi
- İzolasyon sanayi
- Otomotiv sanayi
- Uzay ve havacılık sanayi
- Gıda sanayi
- Temizlik sanayi
- Kâğıt ve mukavva sanayi
- Tekstil ve giyim sanayi
- Ayakkabı ve deri sanayi
- Cam, mermer, granit ve seramik sanayi

2.2.10. Aşındırıcılı Su Jetinin Avantaj ve Dezavantajları

ASJ ile işlemin avantajları, işlenen parça üzerinde ısı etki oluşturmaması, uçucu kesme tozu çıkarmaması, kesme kuvvetlerinin çok küçük olması, sünek veya sert yapılı malzemeler aynı nozul ile kesilebilmesi, ince parçaların üst üste konularak aynı anda kesilebilmesi gibi birçok avantaj bulunmaktadır [6-16,18-22,51-69].

Bunların yanı sıra ASJ sisteminin sahip olduğu diğer avantajlar;

- Kesme bölgesinde ısı etkilenme olmamasından dolayı malzemenin metalürjik özellikleri değişmemektedir,
- İşleme prosesi malzeme üzerinde herhangi bir noktadan başlayabilir olması nedeniyle karmaşık ve zor kesimler gerçekleştirilebilmektedir,

- Genellikle kesme sırasında apak oluşturmamaktadır. Bu nedenle kesim işleminden sonra, ilave işleme gerek duyulmamaktadır,
- Kesme işlemi boyunca geleneksel imalatta olan kesici deęiřtirme, bileme gibi iřlemlere gerek duyulmamaktadır,
- Kesme esnasında fire oranı çok dūřüktür,
- ASJ sistemlerinde kesici fonksiyonlu su ve aşındırıcı malzemeler kolay bulunabilir malzemelerdir. Sistemde kullanılan su, ucuz ve bol olup zehirli yapıda değildir [6-16,18-22,51-69].

ASJ sisteminin dezavantajları;

- ASJ sistemlerine yapılacak ilk yatırım maliyetinin yüksek olması tercih edilmeme nedenleri arasında sayılabilmektedir,
- Malzemenin çok kalın olması halinde kesme yüzeyinin alt kısımlarında dalgalı desen oluşumu söz konusu olmaktadır,
- Çok kalın malzemelerin ASJ ile kesiminde konik kerf oluşumudur,
- ASJ ile kesme işlemi esnasında ortamda hem mekanik hem de aerodinamik gürültü oluşturmasıdır [6-16,18-22,51-69].

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. GİRİŞ

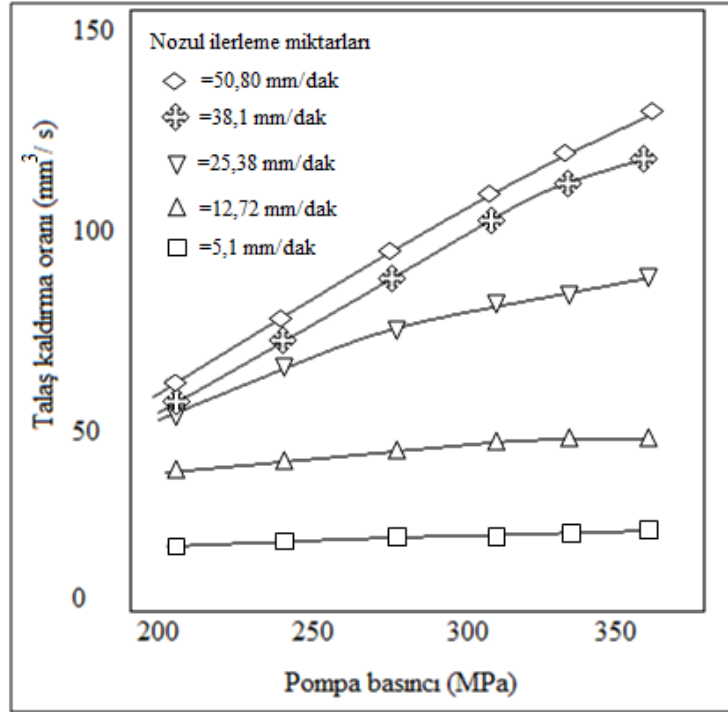
Geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin amacı, farklı enerji türlerini kullanarak metal ve metal olmayan malzemeleri belirli bir profil ve boyuta getirmektir. Son yıllarda malzeme ve teknolojinin gelişimine bağlı olarak minyatürleşen ve işlenmesi zor iş parçaları geleneksel imalat yöntemlerle işlenemez hale gelmiştir. Bu nedenle, geleneksel olmayan işleme yöntemleri minyatür ve işlenmesi zor malzemeler kolaylıkla işlenebilmektedir. Soğuk işleme olarak tanımlanan ASJ ile iş parçası üzerinden erozyon oluşturarak talaş kaldırma esnasında kesme bölgesinde ısı oluşmamaktadır. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşmayan ısı, talaş kaldırma işleminde önemli bir faktör olup, işleme performansı ve iş parçası yüzey kalitesi açısından büyük bir öneme sahiptir [1,3,5,6,41-43].

ASJT işleminde tornalama deney düzeneğinin kullanılması kaçınılmazdır. Yapılan literatür araştırması sonucunda, tornalama deney düzeneği kullanılarak kesme işlemi yapılan farklı deneysel çalışmalar mevcuttur. Fakat tüm deney çalışmalarda, kullanılan tornalama düzenekleri mekanizma olarak birbirlerine benzerlik gösterdiği ve deney düzeneklerinde torna aynası koruma muhafazasının kullanılmadığı tespit edilmiştir.

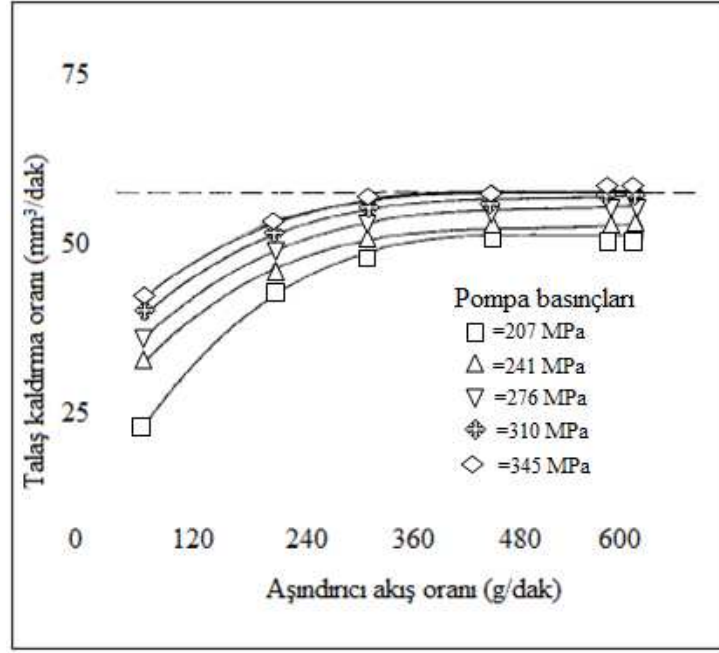
Bu bölümde; yapılacak olan deneysel çalışmaya yön vermek üzere, literatür taraması sunulmuş ve bir değerlendirme yapılmıştır.

3.2. AŞINDIRICILI SU JETİ İLE TORNALAMA ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ansari ve Hashish, AA 6061-T6 alaşımının ASJT ile işlemede ASJ işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında, işleme parametreleri olarak farklı pompa basıncı, aşındırıcı akış oranı, nozul ilerleme miktarını değişken olarak torna devri ve aşındırıcı boyutu sabit olarak kullanılmıştır. Pompa basıncının ve aşındırıcı akış oranının artırılması talaş kaldırma oranında artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.1) ve (Şekil 3.2) [81].

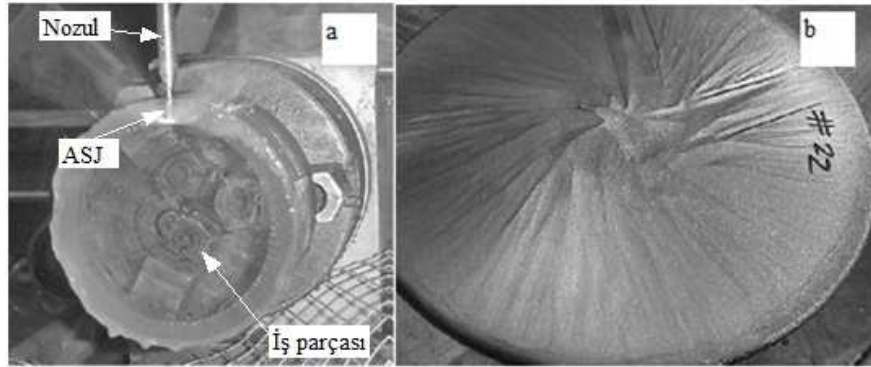


Şekil 3.1. Beş farklı nozul ilerleme miktarı kullanılarak yapılan ASJT işleminde pompa basıncı artışının talaş kaldırma oranına etkisini gösteren grafik [81].



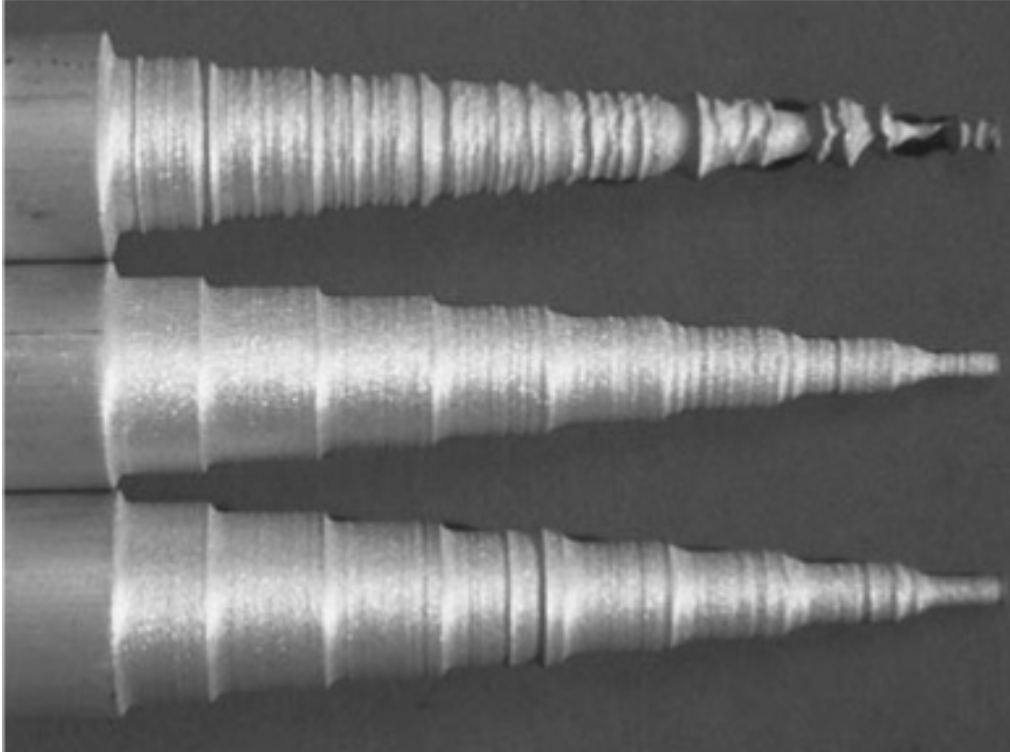
Şekil 3.2. Beş farklı pompa basıncı kullanılarak yapılan ASJT işleminde aşındırıcı akış oranı artışının talaş kaldırma oranına etkisini gösteren grafik [81].

Hashish, ASJT ile işlenmiş malzeme yüzeylerinin makro karakteristiğinin incelenmesi isimli çalışmasında, işleme parametrelerinin tornalanmış yüzeylerde yapmış olduğu izleri incelemiştir. Çalışmada, 25 mm çapında alüminyum numuneler kullanılmıştır. Talaş kaldırma işlemi sonrasında bitmiş iş parçası yüzeylerinde yüzey dalgalılıkları olduğu gözlemlenmiştir. ASJT ile iş parçası üzerinde alın tornalaması işlemleri uygulama anı görüntüsü Şekil 3.3a'da, nozul mesafesinin artması ile alın yüzeyde oluşan yüzey dalgalılık görünümü Şekil 3.3b'de gösterilmiştir [82].



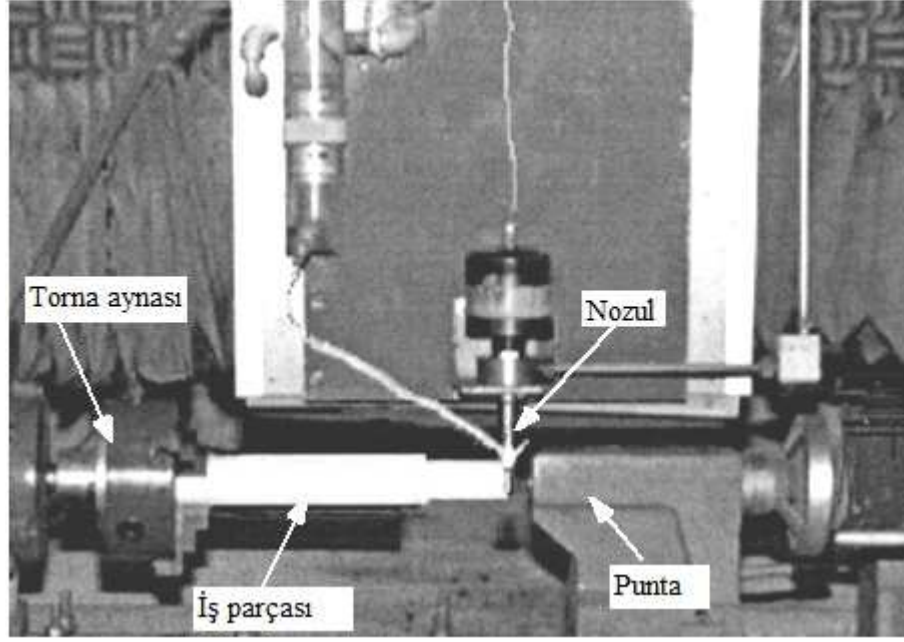
Şekil 3.3. a) Alın tornalama işlemi görüntüsü, b) Alın tornalama işlemi sonrasında alın merkezinde oluşan dalgalılık görüntüsü [82].

Sabit nozul yaklaşma mesafesi kullanılarak farklı nozul ilerleme miktarları ile alüminyum numunesi üzerinde boyuna tornalama çalışmalarının makro görüntüleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Deneyler sonucunda, nozul yüksekliği arttıkça talaş kaldırma miktarında azalmanın olduğu ve jetin etkisinin yitirildiği belirtilmiştir. Nozul ilerleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığı belirtilmiştir [82].



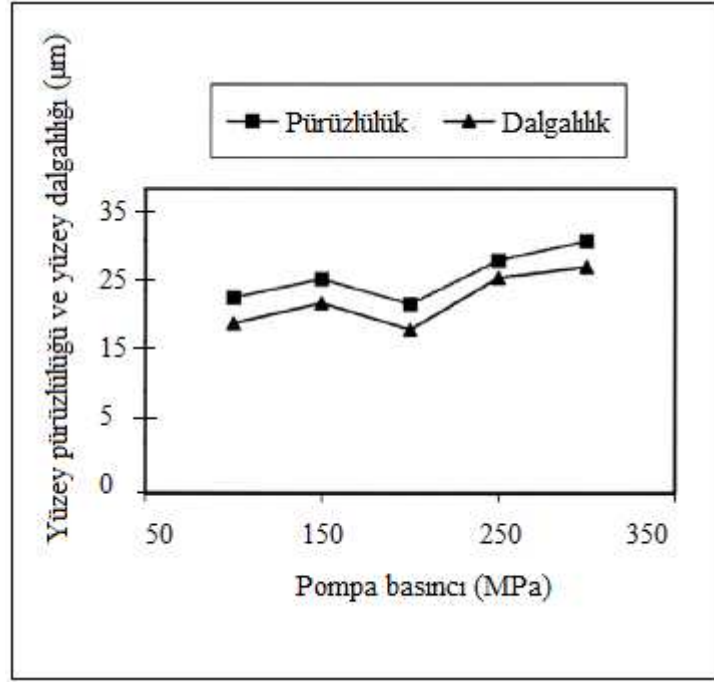
Şekil 3.4. Farklı nozul ilerleme miktarlarında oluşan makro yüzey görüntüleri [82].

Zhong ve Han, Şekil 3.5'te gösterilen tornalama deney düzeneğini gerçekleştirerek cam malzemenin tornalanması çalışmasını yapmışlardır [83].



Şekil 3.5. Silindirik cam malzemenin ASJ ile tornalanması görüntüsü [83].

Deney düzeneğinde, elektrik motorunun miline torna aynası direkt olarak bağlantı yapılmış ve herhangi bir ara aktarma elemanı kullanılmamıştır. Torna aynası, basınçlı su ve aşındırıcı partiküllere karşı yalıtılmamıştır. Deneysel çalışmalarında deney numunesi olarak çapı 25 mm olan silindirik cam numuneleri kullanmışlardır. İşleme parametreleri olarak, torna aynası devri, nozul yaklaşma mesafesi, pompa basıncı, nozul ilerleme miktarı ve aşındırıcı akış oranı değişken olarak kullanılmıştır. Çalışmalarında, nozul ilerleme miktarı arttıkça yüzey pürüzlülük ve yüzey dalgalılık değerlerinde artış olduğunu belirtmişlerdir. İş parçası devir sayısının artmasına bağlı olarak iş parçası yüzey kalitesinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülük değerleri düşük nozul ilerleme miktarı ve yüksek devir sayılarında elde edilmiştir. Nozul yaklaşma mesafesinin artması yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek elde edilmesine neden olmuştur. Pompa basıncının artırılması yüzey pürüzlülük ve dalgalılık değerlerinin yüksek elde edilmesine neden olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.6) [83].



Şekil 3.6. Pompa basıncının yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgahlığına etkisi grafiği görüntüsü [83].

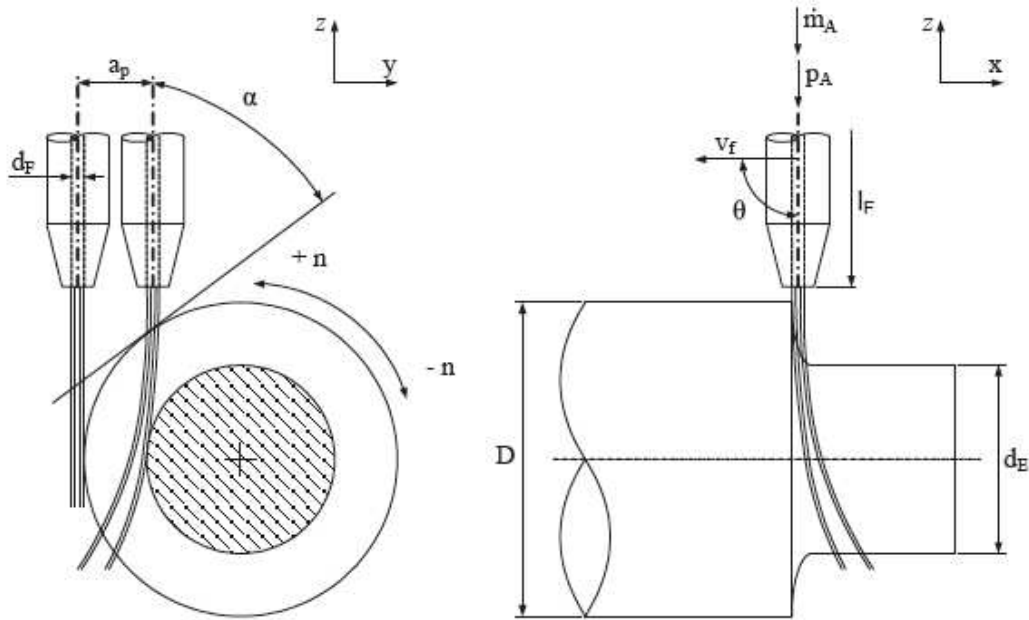
Andersson ve arkadaşları, ASJT ile test numunesi hazırlama çalışmasında ASJT ile geleneksel tornalama yönteminin mukayeselerini yapmışlardır. ASJT işlemi için Şekil 3.7’de gösterilen torna deney düzeneğini geliştirmişlerdir [84].



Şekil 3.7. ASJT deney düzeneği ve ASJ ile işleme anı görüntüsü [84].

ASJ ile numune hazırlama esnasında iş parçası üzerinde ısı etkisi oluşturmadığı, aynı nozul ile çeşitli sertlik özelliklerine sahip malzemelerin işleme zamanının ve maliyetinin daha düşük olduğunu belirtmişlerdir [84].

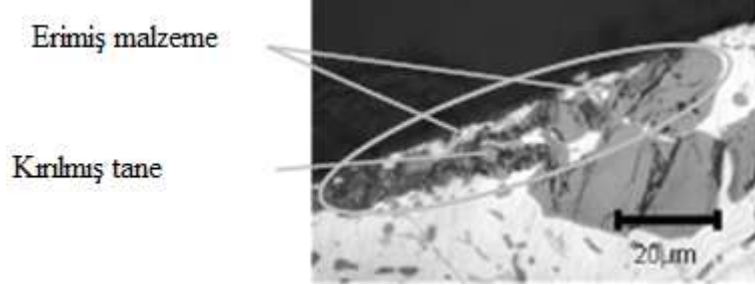
Uhlmann ve arkadaşları, ASJT ve geleneksel tornalama ile titanyum alüminyum alaşımının tornalanması çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. ASJT ile işlemede, 5 eksenli ASJ tezgâhı kullanmışlardır. ASJT ile işleme yapabilmek için torna deney düzeneği geliştirmişlerdir. ASJT ile işlemenin şematik gösterimi Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. ASJT ile işlemenin şematik gösterimi [85].

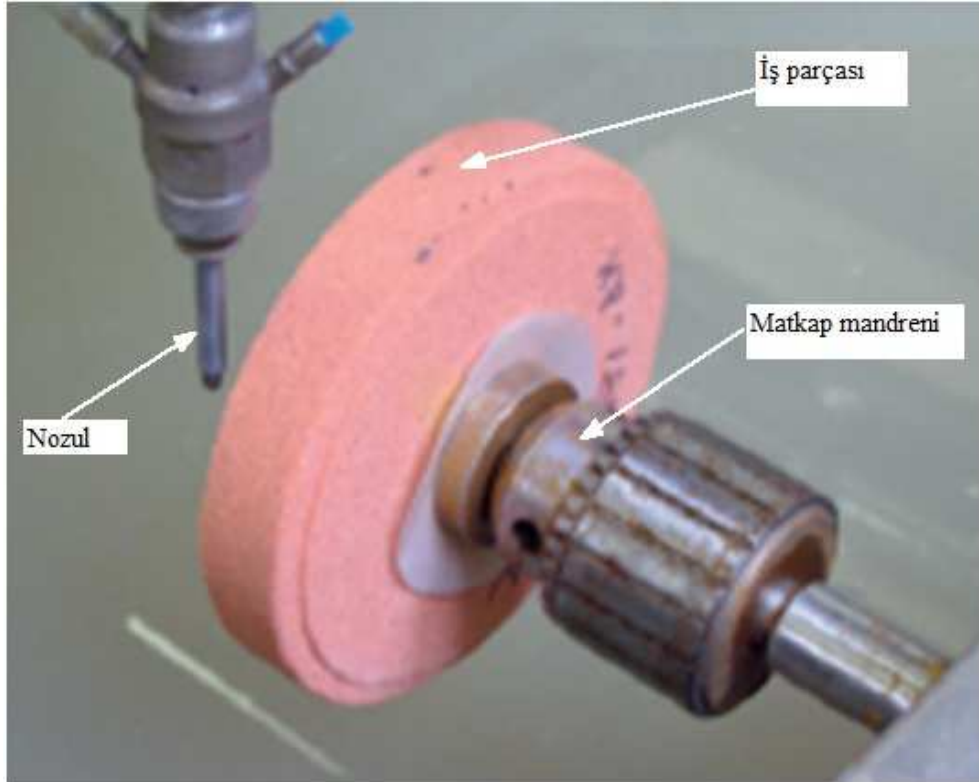
Deneplerinde, aşındırıcı akış oranı 100 ile 600 g/dak arasında değerler seçilmiştir. Aşındırıcı olarak 80 Mesh boyutunda garnet kullanmışlardır. Nozul ilerleme miktarı 10 mm/dak, pompa basıncı 550 MPa, nozul yaklaşma mesafesi 50 mm ve nozul yaklaşma açısı 30° sabit olarak seçilmiştir. Çalışmaları sonucunda, klasik tornalama işleminde işleme kuvveti ve sürtünmeden kaynaklı ısı etkisi ile kesici takım üzerinde yığıntı talaş oluştuğunu SEM görüntüleri ile belgelemişlerdir (Şekil 3.9). Malzeme tane sınırlarında oluşan kırılma ve çarpılma gibi hataların klasik tornalama işleminde daha çok olduğu Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Kaldırılan talaş hacmi oranlarına göre en fazla talaş hacmi ASJ ile işlemede elde edildiği (13 cm³) belirtilmiştir. ASJT

işleminde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değeri 5 ile 20 μm arasında elde edilmiştir [85].



Şekil 3.9. Klasik tornalama esnasında kesici takım üzerinde oluşan yığıntı talaş ve tane sınırında oluşan kırılmaların SEM görüntüsü [85].

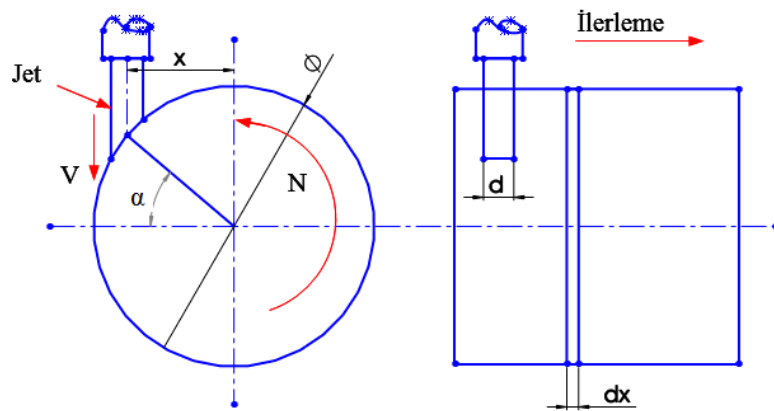
Axinte ve arkadaşları, kumaş taşlama diskinin ASJ ile tornalanmasında işleme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Tornalama işleminin yapılabilmesi için Axinte ve arkadaşları tarafından torna deney düzeneği tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Torna deney düzeneğinin gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir [86].



Şekil 3.10. Kumaş taşlama diski tornalama deney düzeneği görüntüsü [86].

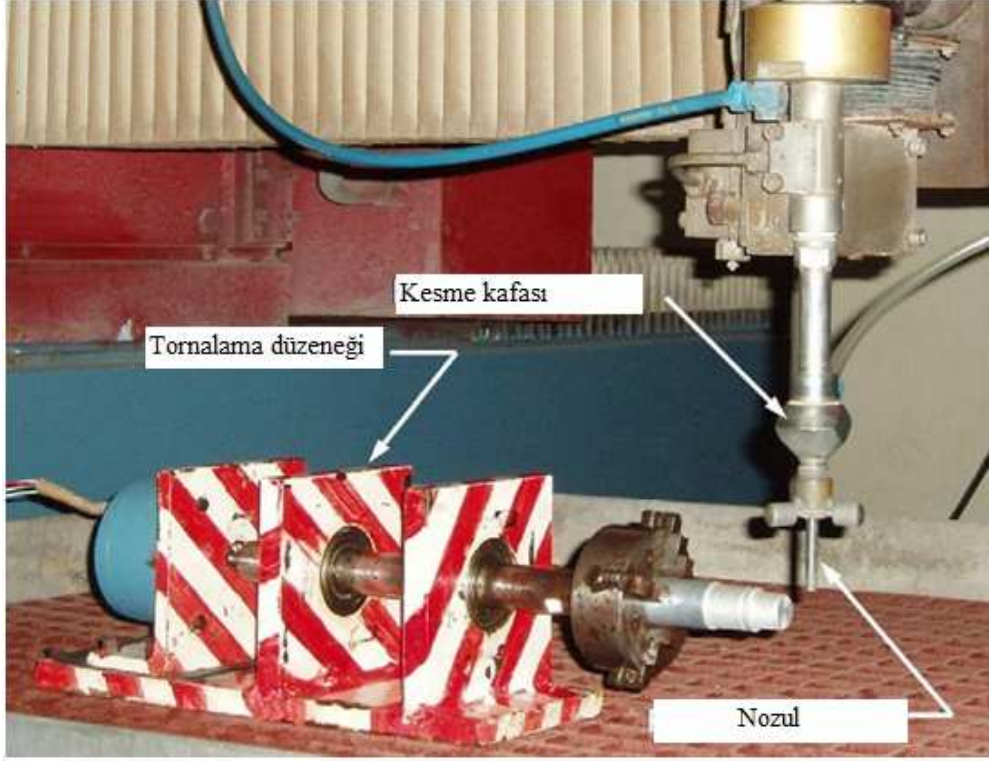
Kumaş taşlama diski üzerinde konveks ve konkav profil geometrileri oluşturulmuştur. Çalışmalarında, ASJT'nin yeni bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. Deneyleerde 50 ve 140 mm çapında alüminyum oksit yapıda iki farklı boyut ölçülerine sahip taşlama diski kullanmışlardır. ASJ tezgahı olarak 5 eksenli KMT marka 413 MPa ultra yüksek basınçlı ASJ pompası kullanılmıştır. Orifis çapı 0,3 mm nozul çapı ise 1,1 mm olarak seçilmiştir. İşleme parametreleri olarak torna devri 90-168 dev/dak; nozulun z eksenli yönünde ilerleme oranı 1-120 mm/dak, nozul yaklaşma mesafesi 5-60 mm, pompa basıncı 69-415 MPa, aşındırıcı garnet formunda 80 Mesh boyutundadır. Çalışma sonucunda seçilen işleme parametreleri etkisinde nozul ilerleme miktarı 10 mm/dak'dan 30 mm/dak'ya arttırıldığında işleme genişliğinde 3,6 mm den 2,6 mm değerine düşüş gösterdiği, taşlama diski verilen profil kesitlerinin ölçü doğruluğu nozul mesafesinin artırılması ile bozulduğu, ölçü doğruluğu jetin çapına ve odaklanmasına bağlı olduğunu, dağılmayan jet oluşumunda daha doğru sonuçların elde edilebileceğini, aşındırıcı miktarınının 285 g/dak değerinde oluşan jetin daha doğrusal ve saçılmayan jet oluşumu sağladığını belirtmişlerdir [86].

Manu ve Babu, ASJ ile işlemede erozyon modeli oluşturmak için yapılan çalışmada, Finnie'nin erozyon modeli temel alınarak matematiksel model geliştirmişlerdir. ASJ ile işlemede aşındırıcı ve suyun iş parçasına çarpma açısının, çap düşmesinin bir fonksiyonu olarak modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.11'de ASJ'nin iş parçasına çarpma açısı gösterilmiştir.



Şekil 3.11. ASJ'nin iş parçasına çarpma açısı görüntüsü [87].

Deneysel çalışmalarında deney numunesi olarak Alüminyum 6063 kullanılmıştır. ASJ ile işlemede verilerin elde edilmesi için Şekil 3.12’de gösterilen torna deney düzeneğini tasarlayarak kullanmışlardır.

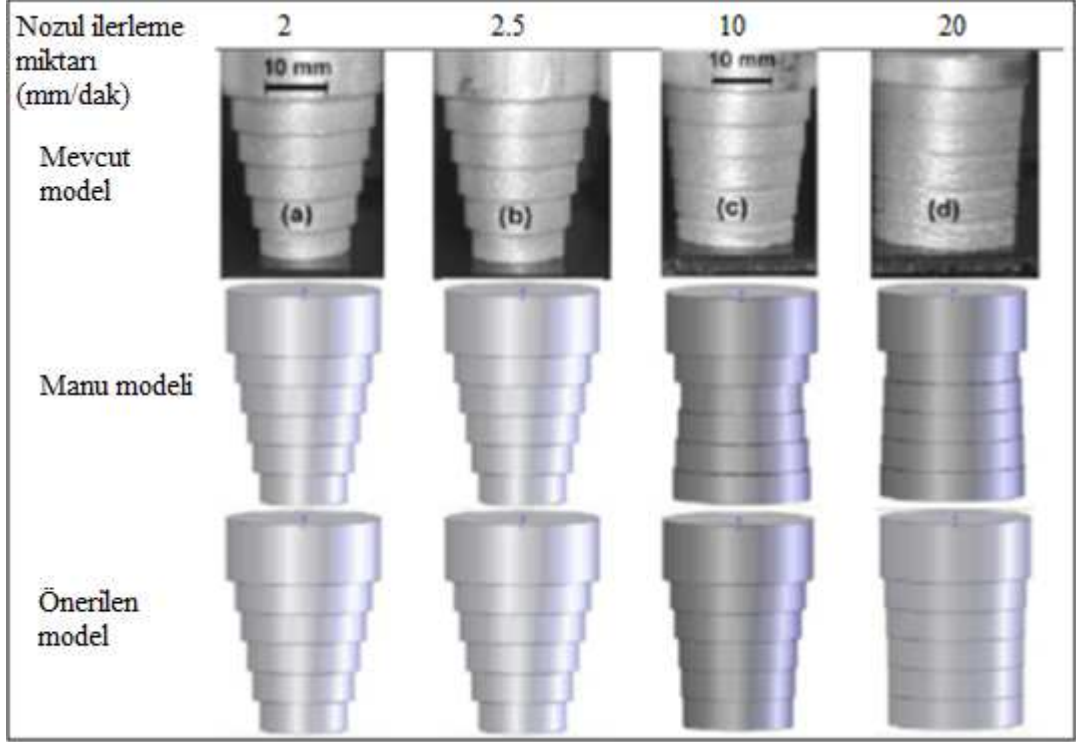


Şekil 3.12. ASJ tornalama deney düzeneği görüntüsü [87].

İşleme parametreleri olarak, pompa basıncı (250 MPa), aşındırıcı akış oranı (5 g/s), aşındırıcı boyutu (80 Mesh garnet), üç farklı nozul çapı (0,76, 1,2 ve 1,6 mm), dört farklı torna aynası devri (13, 25, 37 ve 50 dev/dak), on iki farklı nozul ilerleme miktarı (1, 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50 mm/dak) ve beş farklı nozul mesafesi (11,7, 10,7, 9,7, 8,7, 7,7 mm) değerleri kullanılmıştır. Deneysel sonucu elde edilen değerler ile matematik model sonucunda tahmin edilen değerlerin bir birine yakın olduğu belirtilmiştir [87].

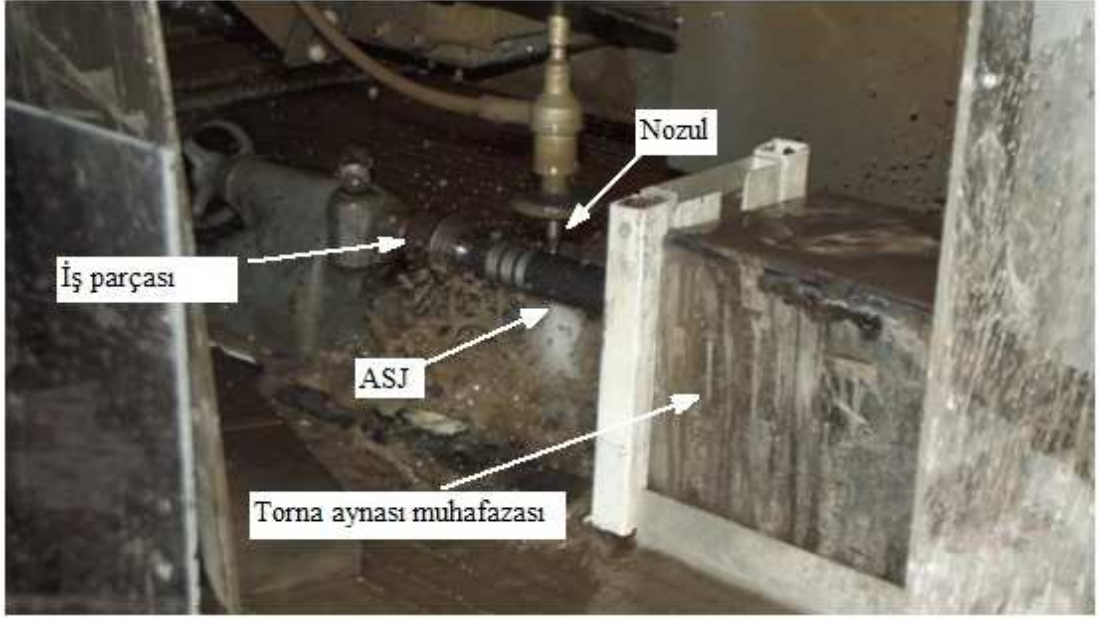
Zohourkari ve Zohoor, sünek malzemenin ASJT’da talaş kaldırma işlemi sonrasında son çap değerinin tahmini için matematik model oluşturmuşlardır. Çalışmalarında, Manu ve Hashish modellerini yeniden modelleyerek üçüncü bir matematik model oluşturmuşlardır. Teorik çalışmalarının doğrulunu gerçek imalatla mukayese yapabilmek için ASJ ile deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlarını

gösteren makro görüntüler Şekil 3.13'te verilmiştir. Araştırmacılar yapmış oldukları çalışma sonucunda teorik model ile deneysel sonuçlar arasında benzerlikler olduğunu belirtmişlerdir [88].



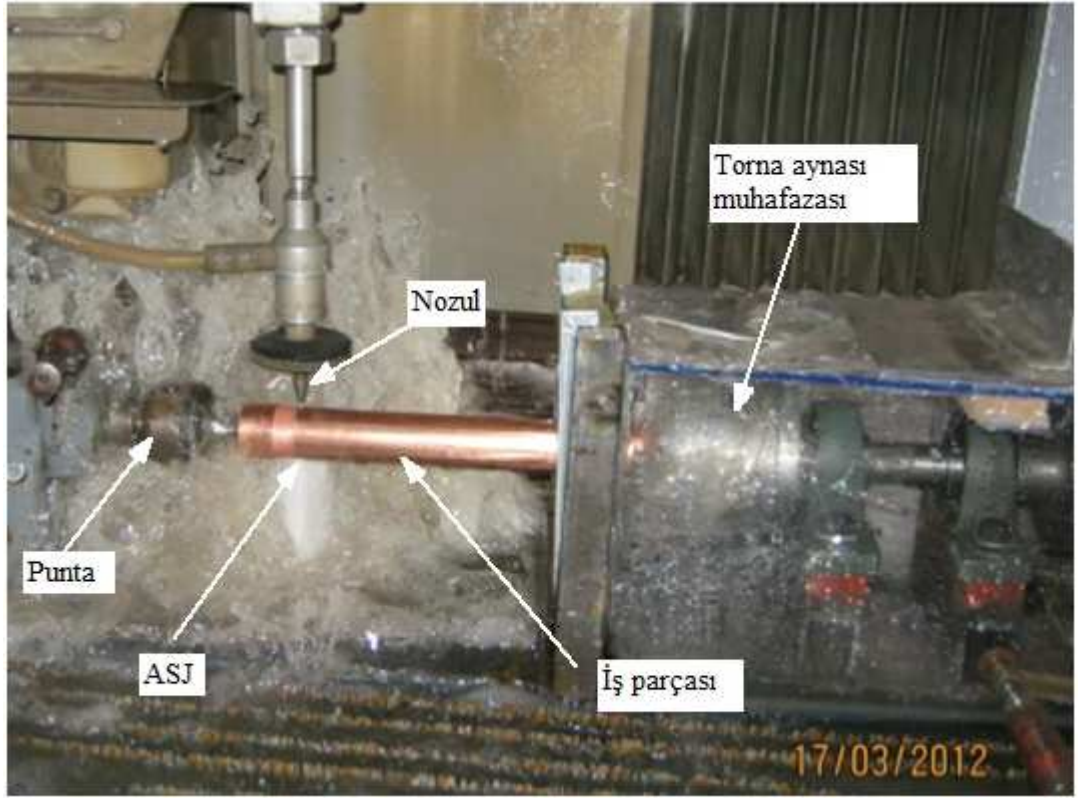
Şekil 3.13. Deneysel sonuçların Manu modeli ile karşılaştırılması görüntüsü [88].

Kartal ve Gökkaya, Şekil 3.14'te gösterilen ASJ ile silindir numunelerin tormalanabilmesi için hibrit tormalama deney düzeneği geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, ASJT işleminde aşındırıcı ve sudan etkilenen tahrik motoru ile torna aynası için emniyet kabini geliştirmişlerdir. Geliştirmiş oldukları emniyet kabini sayesinde tormalama esnasında karşılaşılan olumsuzluklar giderilmiştir [89].



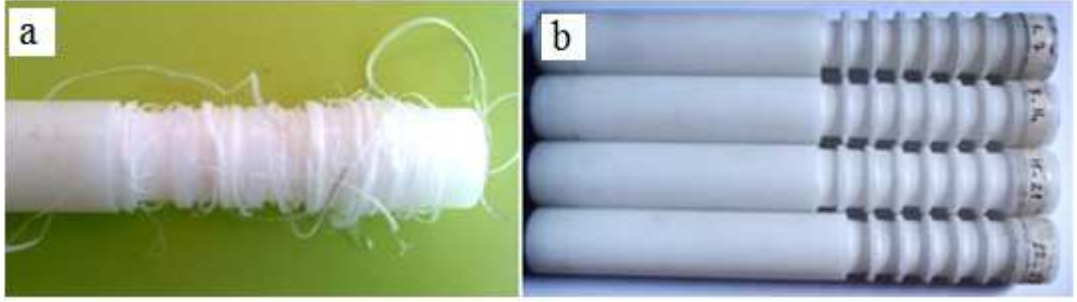
Şekil 3.14. ASJ tezgahı için imalatı gerçekleştirilen torna deney düzeneği görüntüsü [89].

Kartal ve arkadaşları, (Cu-Cr-Zr) bakır alaşımının ASJ ile tormalanması esnasında işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırmışlardır. Deneysel çalışmalarda, pompa basıncı 350 MPa, 80 mesh boyutunda garnet aşındırıcı, nozul çapı 1,2 mm olarak sabit tutulmuştur. Deneylerinde \varnothing 30 ve 240 mm ebatlarında bakır alaşımı kullanmışlardır. Deney parametreleri olarak nozul ilerleme miktarı (10, 15, 20 ve 25 mm/dak), aşındırıcı akış oranı (50, 150, 250 ve 350 g/dak), torna aynası devri (25, 50, 75 ve 100 dev/dak) ve nozul mesafesi (2, 5, 8 ve 11 mm) seçilerek ASJ ile işlenmiştir (Şekil 3.15). Deney sonuçlarına göre işleme parametrelerinden nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesinin artmasının ortalama yüzey pürüzlülüğünün artışına neden olduğunu ve ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin 2,5- 5,5 μ m arasında elde edildiğini belirtmişlerdir [90].



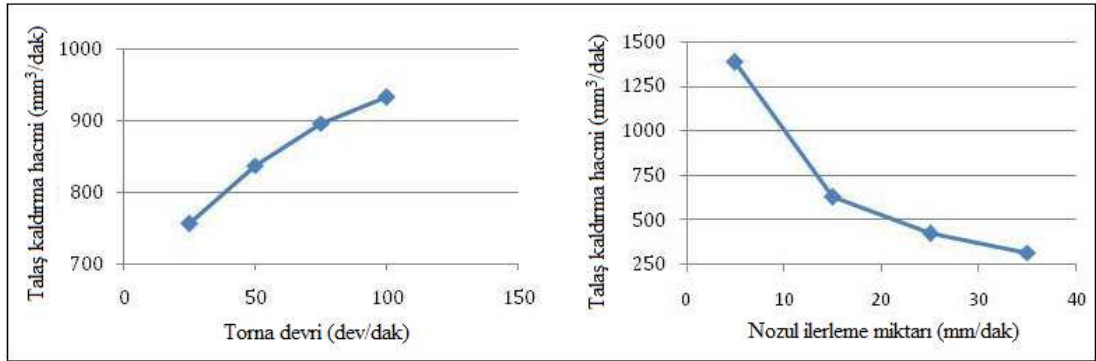
Şekil 3.15. Bakır alaşımının ASJ ile tornalanması anı görüntüsü [90].

Kartal ve arkadaşları, düşük yoğunluklu polietilen malzemenin AWJT işleme parametreleriyle Taguchi L_{18} deney düzeneği oluşturarak işlemişlerdir. Çalışmalarında, polietilen iş parçasını klasik torna tezgâhı ile talaşlı işleme çalışmaları yapmışlardır. Yapmış oldukları talaşlı imalatta polietilen iş parçasının yüzey pürüzlülüğü yüksek olduğu talaşların bitmiş yüzeye sarımlar şeklinde oluştuğunu belirtmişlerdir. ASJT ile işlemede ise klasik tornalamada karşılaşılan olumsuzlukların oluşmadığı ve işleme bölgesinde ASJ'nin işleme özelliğine bağlı olarak ısıl deformasyon ile erime gerçekleşmediği belirtilmiştir. Şekil 3.16 (a)'da klasik torna ile işlenmiş, Şekil 3.16 (b)'de ASJT ile işlenmiş düşük yoğunluklu polietilen malzemenin görüntüsü verilmiştir [91].



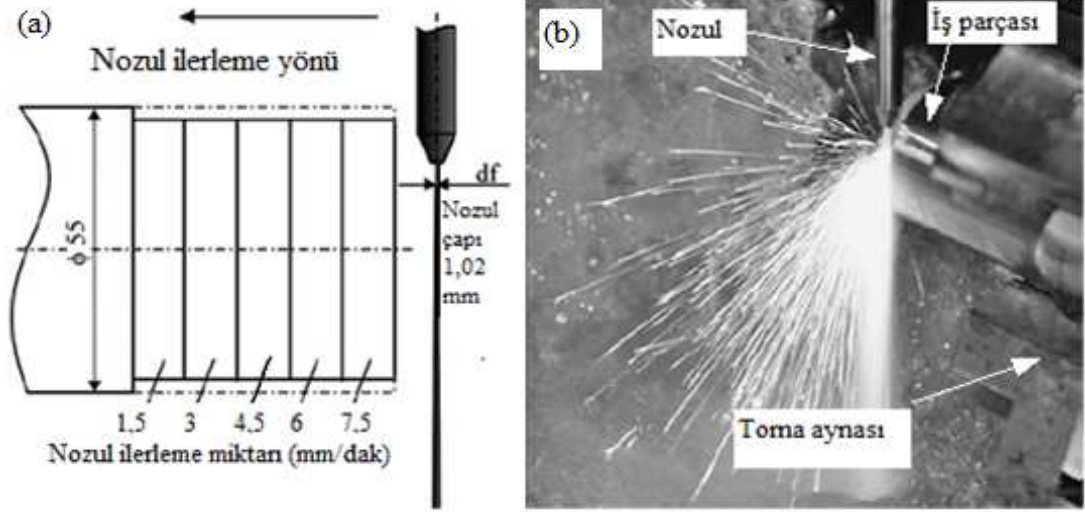
Şekil 3.16. Düşük yoğunluklu polietilen malzemenin a) klasik torna ile işlenmiş, b) ASJT ile işlenmiş görüntüsü [91].

Kartal ve Gökçaya, AISI 1040 çeliğinin ASJ işleme parametrelerinin kaldırılan talaş hacmi değerine ve işleme derinliğine olan etkisini araştırmıştır. ASJ ile tornalamada talaş kaldırma hacmi ve işleme derinliğine torna aynası devri, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı ve nozul yaklaşma mesafesinin etkili olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.17) [92].



Şekil 3.17. Torna devri ve nozul ilerleme miktarının talaş kaldırma hacmine etkisi grafik görüntüsü [92].

Hloch ve arkadaşları, Ø 55 mm titanyum malzemesinin ASJ ile tornalanmasını deneysel olarak gerçekleştirmişlerdir. Aşındırıcı olarak 60 mesh boyutunda garnet kullanılmıştır. İşleme parametreleri olarak pompa basıncı (400 MPa), torna devri (60 dev/dak), nozul yaklaşma mesafesi (10 mm), ve aşındırıcı akış oranını (400 g/dak) sabit tutulmuş ve beş farklı nozul ilerleme miktarı (1,5; 3; 4,5; 6 ve 7,5 mm/dak), kullanılmıştır. Şekil 3.18a'da ASJT ile işleme koşullarının gösterimi, Şekil 3.18b'de ise titanyum malzemenin ASJT ile işlenmesi görüntüsü verilmiştir [93].

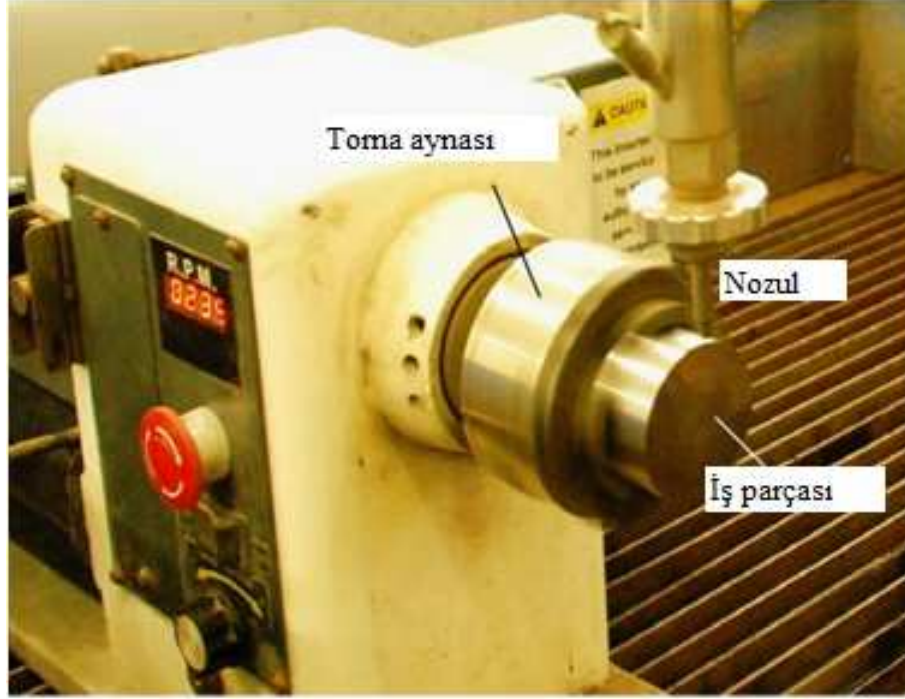


Şekil 3.18. a) ASJT ile işleme koşulları teorik gösterimi, b) Titanyum malzemenin ASJT ile işlenmesi anı görüntüsü [93].

Şekil 3.18b’de gösterilen ASJ ile tornalamada iş parçası torna deney düzeneğine herhangi bir muhafaza yapılmadan doğrudan bağlandığı ve işlendiği belirtilmiştir. Titanyum malzemenin ASJT ile işlenmesi sonucunda nozul ilerleme miktarının 1,5 mm/dak değerinde ortalama yüzey pürüzlülük değerini 6,984 μm , en yüksek nozul ilerleme miktarı 7,5 mm/dak değerinde ise ortalama yüzey pürüzlülük değerini 8,308 μm olarak elde etmişlerdir. Nozul ilerleme miktarının artması ortalama yüzey pürüzlülük değerini arttırdığını talaş kaldırma oranını azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca ASJ ile tornalama işleminin işlenmesi geleneksel yöntemlerle zor olan malzemelerin işlenmesinde önemli bir role sahip olduğunu ve avantajlar sunduğunu belirtmişlerdir [93].

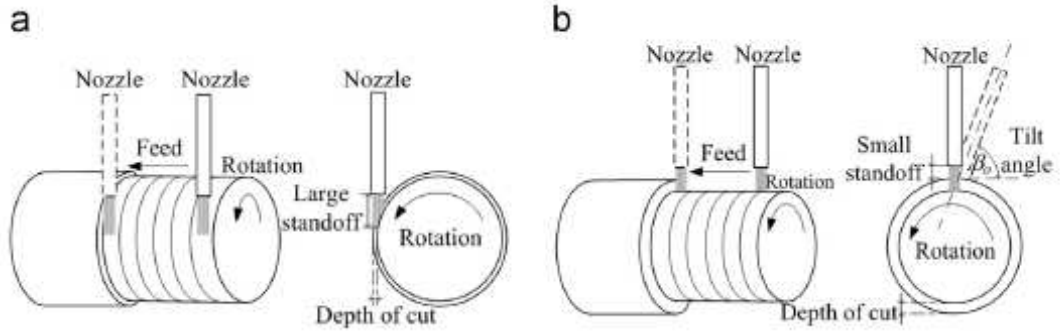
Li ve arkadaşları, yüksek mukavemetli AISI 4340 çelik numunelerini ASJ ile tornalama işlemini gerçekleştirmişlerdir. AISI 4340 çeliğinin ASJT ile işlemede işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne ve talaş kaldırma oranına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. İşleme parametreleri olarak; nozul ilerleme miktarı (3, 6, 12 ve 24 mm/dak), pompa basıncı (200, 260, 320 ve 380 MPa), aşındırıcı akış oranı (228, 333, 420 ve 498 g/dak), nozul açısı (45, 60 75 ve 90°) ve torna devri (97,194, 389 ve 777 dev/dak) kullanmışlardır. Bernouli denkleminde yararlanarak ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı değerlerini tahmin edebilmek için matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri matematik model

ile deneysel veriler arasında hata oranı % 2 olmuştur. ASJT ile işleme yapabilmek için Şekil 3.19’da gösterilen tornalama deney düzeneğini kullanmışlardır [94].



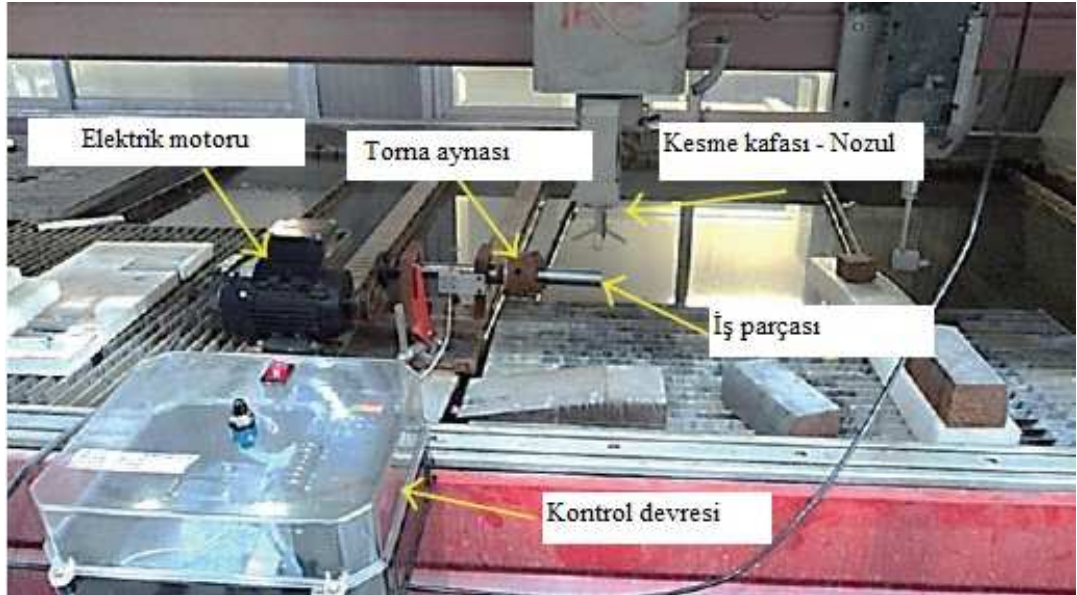
Şekil 3.19. ASJ ile tornalamada kullanılan deney düzeneği görüntüsü [94].

Çalışmalarında, seçmiş oldukları işleme parametreleri sınırlarında optimum talaş kaldırma oranı elde etmek için nozul ilerleme miktarı 6 mm/dak, pompa basıncı 380 MPa, aşındırıcı akış oranının 498 g/dak, ASJ çarpma açısının 90 ° ve torna devrinin 777 dev/dak olması gerektiğini tespit etmişlerdir. Torna devri arttıkça kesme derinliğinin artış gösterdiğini vurgulamışlardır. ASJT deneylerinde Radyal mod (Şekil 3.20 a) ve Ofset mod (Şekil 3.20b) ile işleme yönteminden yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı için hangisinin daha faydalı olduğunu araştırmışlardır. Radyal mod işleminin Ofset mod ile işlemeye göre daha pürüzlü yüzeyin elde edilmesini sağladığını ve daha pürüzsüz yüzey elde edebilmek için Ofset mod ile ASJT işlenmesi gerektiğini vurgulamışlardır [94].



Şekil 3.20. ASJT işleme teknikleri: a) Ofset mod, b) Radyal mod işleme [94].

Zohourkari ve arkadaşları, ASJT işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisini araştırmışlardır. ASJT işleme parametreleri olarak pompa basıncı (130, 200, 250, 300 ve 370 MPa), aşındırıcı akış oranı (106, 230, 324, 422 ve 557 g/dak), nozul ilerleme miktarı (0,3, 3, 5, 7 ve 9,8 mm/dak), torna devri (160, 300, 400, 500 ve 640 dev/dak) olarak seçilmiştir. İş parçası olarak \varnothing 30 mm AA 2011-T4 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA 2011-T4 alüminyum alaşımını ASJ ile tormalayabilmek için Şekil 3.21’de gösterilen tormalama deney düzeneğini kullanmışlardır [95].

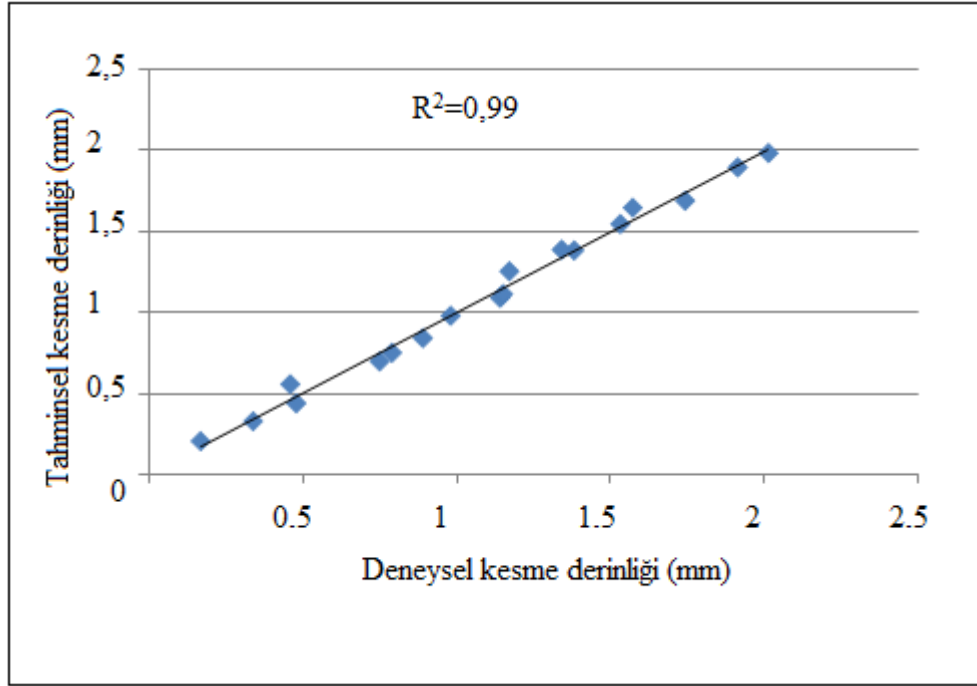


Şekil 3.21. ASJT’da kullanılan tormalama deney düzeneği görüntüsü [95].

Çalışmalarında, işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisini belirlemek için istatistiksel olarak varyans analizi, yanıt yüzey metodu ve çoklu regresyon analizlerini gerçekleştirmişlerdir. İşleme parametreleri sınırları çerçevesinde torna

devri haricinde diğ er parametrelerin istatistiki olarak talaş kaldırma oranına etki ettiğ i ve nozul ilerleme miktarının en etkili parametre olduğu ifade edilmiştir [95].

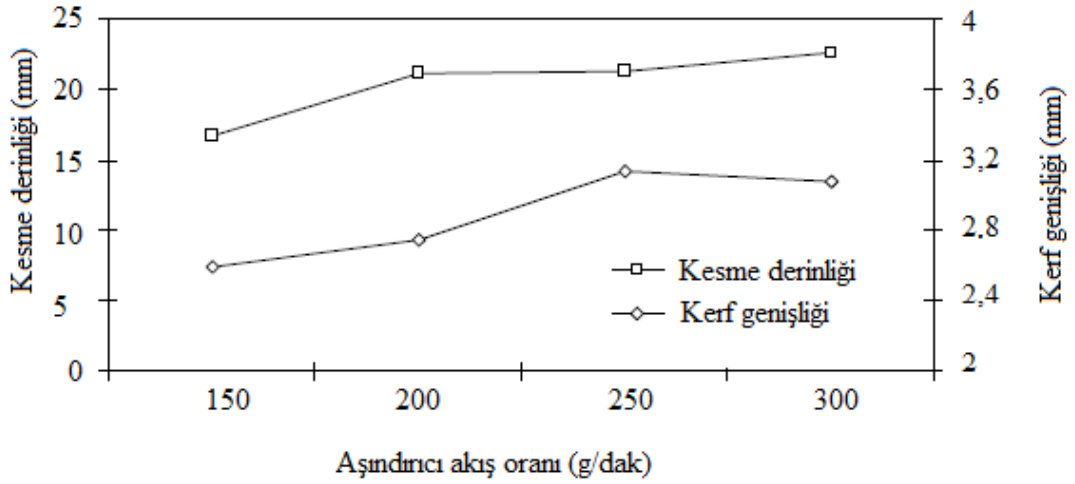
Kartal ve Gökkaya, AISI 1050 ç elik malzemenin AWJT ile işlenebilirliğini araştırmak için özel tornalama deney düzeneğ i geliştirilmiştir. İşleme parametreleri olarak, nozul ç apı (0,7 ve 1,3 mm), nozul ilerleme miktarı (5, 25 ve 45 mm/dak), aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 350 g/dak), torna devri (500, 1500 ve 2500 dev/dak) ve nozul yaklaşma mesafesini (2, 10 ve 18 mm) olarak seçmişlerdir. Deney tasarımı Taguchi L_{18} olarak oluşturulmuş ve bu düzene göre gerçekleştirmişlerdir. AWJT işleme parametrelerinin kesme derinliğ i üzerindeki etkileri varyans analizi ile araştırmışlardır. Çalışmalarında kesme derinliğ ine etki eden faktörler arasındaki etkileşimden faydalanarak, bunların doğrusal regresyon modeli sunulmuştur. Çalışma sonucunda AWJT prosesi ile tek bir pasoda imalat kusuru oluşmadan yüksek oranda talaş kaldırılması sağlanabildiğ i belirtilmiştir. Kesme derinliğ i üzerinde en yüksek etkiyi sırasıyla nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, torna devri parametreleri gösterdiğ i sunulmuştur. Varyans etki yüzdelerine göre kesme derinliğ i üzerinde sırasıyla nozul ilerleme miktarı % 75 ve aşındırıcı akış oranı % 14 etkili olduğu bildirilmiştir. Kesme derinliğ ine etki eden faktörler arasındaki etkileşimden faydalanarak, bunların doğrusal Regresyon modeli sunulmuştur, regresyon model ile elde edilen verilerin deneysel verilerle karşılaştırmasını yapmışlardır (Şekil 3.22) [96].



Şekil 3.22. AISI 1050 çelik malzemenin ASJT ile işlenmesinde işleme parametrelerini kesme derinliğine etkisinde deneysel ve tahminsel kesme derinliği değerlerinin karşılaştırılması grafiği [96].

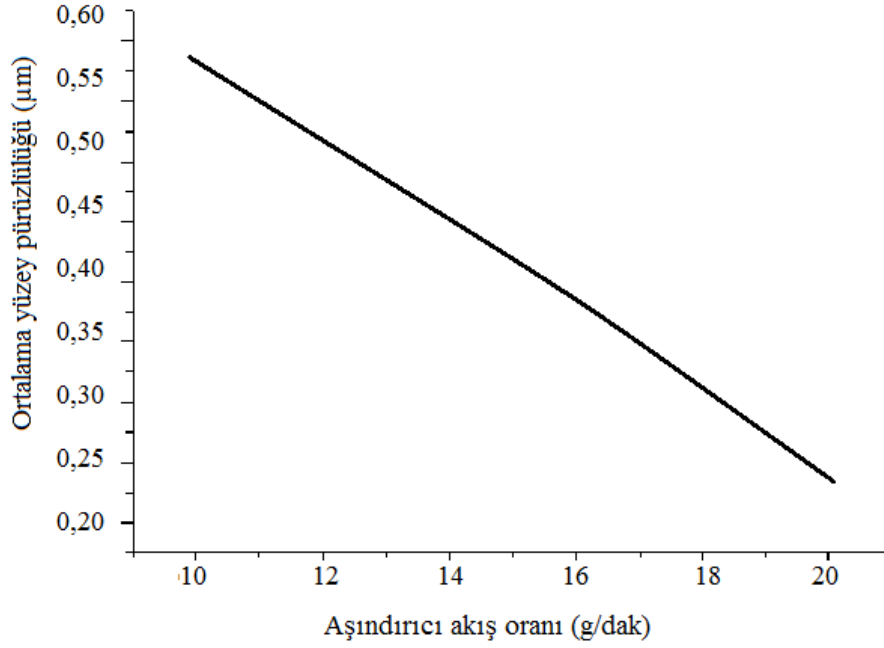
3.3. DİĞER SU SETİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Karakurt ve arkadaşları, nozul ilerleme hızı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi, su basıncı ve aşındırıcı parçacık boyutu gibi ASJ işleme parametrelerinin kesme derinliği ve kerf genişliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler Taguchi metodu kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları varyans analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Nozul ilerleme hızındaki artışın kesme derinliğini ve kerf genişliğini azalttığı sonucuna varmışlardır. Nozul yaklaşma mesafesindeki artış kesme derinliğini azalttığı fakat kerf genişliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Pompa basıncındaki artış kesme derinliğini de kerf genişliğini de belirli bir limite kadar arttırdığı sonucuna varmışlardır. Yaptıkları varyans analizine göre kesme derinliğini belirlemedeki en önemli faktörler nozul ilerleme hızı, aşındırıcı akış oranı (Şekil 3.23) ve aşındırıcı boyutu olduğunu tespit etmişlerdir [97].



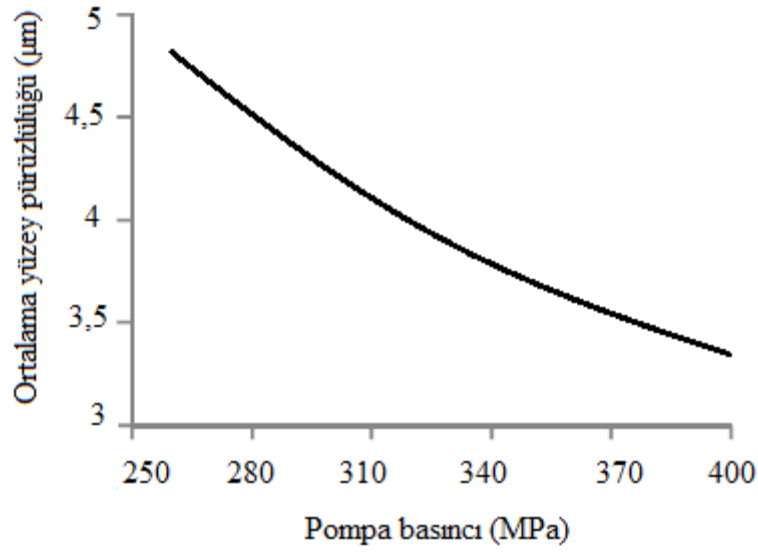
Şekil 3.23. Aşındırıcı akış oranının kesme derinliğine etkisi grafik görüntüsü [97].

Ghoshy ve arkadaşları, silisyum nitrür (Si_3N_4) malzemenin ASJ ile kesilmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. Aşındırıcı olarak 80 mesh boyutunda silisyum karbür tozu kullanmışlardır. İşleme parametreleri olarak aşındırıcı akış oranı (10; 12,5; 15; 17,5; 20), pompa basıncı (500, 525, 550, 575 ve 600 MPa), nozul ilerleme miktarı (1; 2,5; 4; 5,5 ve 7 mm/dak) ve nozul yaklaşma mesafesi (4, 7, 10, 13 ve 16 mm) olarak seçmişlerdir. Çalışma sonucunda pompa basıncının, nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığını tespit etmişlerdir. Aşındırıcı akış oranının artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını belirtmişlerdir (Şekil 3.24) [98].



Şekil 3.24 Aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi grafik görüntüsü [98].

Selvan ve kumar, ASJ ile titanyum malzemenin kesilmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. İşleme parametreleri üç seviyeli olarak pompa basıncı (270, 335 ve 400 MPa), nozul ilerleme miktarı (30, 615 ve 1200 mm/dak), aşındırıcı akış oranı (48, 690 ve 900 g/dak) ve nozul yaklaşma mesafesi (1,8; 3,4 ve 5 mm) olarak kullanılmıştır. Deneysel analiz için L9 Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Ortalama yüzey pürüzlülüğünde en çok etkiyi pompa basıncı göstermiştir. Pompa basıncının artması işlenen numunenin yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Pompa basıncının yüksek olması kesme performansını arttırdığını belirtmişlerdir (Şekil 3.25). Aşındırıcı akış oranının artırılmasının ortalama yüzey pürüzlülük değerini düşürdüğünü, nozul ilerleme miktarının artması yüzey pürüzlülük değerini arttırdığını, nozul ilerlemenin düşük tutulması yüzey kalitesini arttırırken işleme maliyetini arttırdığını belirtmişlerdir. Nozul yaklaşma mesafesinin düşük tutulmasıyla kinetik enerjideki kayıpların daha az olduğunu ve böylelikle daha kaliteli yüzey elde edildiğini belirtmişlerdir [99].





Şekil 3.25. Pompa basıncının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi grafik görüntüsü [99].

Reddy ve arkadaşları, 6 mm kalınlıktaki Inconel sac levha malzemesinin ASJ ile kesilmesinde, işleme parametrelerinin Taguchi metodu ile optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında, aşındırıcı olarak 80 mesh garnet, pompa basıncı 380 MPa, ve 1,1 mm nozul çapı kullanmışlardır. İşleme parametreleri; nozul ilerleme miktarı (160, 200 ve 225 mm/dak), aşındırıcı akış oranı (500, 600 ve 700 g/dak) ve nozul yaklaşma mesafesi (2, 3 ve 4 mm) olarak kullanmışlardır. Taguchi metodu ve varyans analizi ile ASJ işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerini araştırmışlardır. Nozul ilerleme miktarının ve nozul yaklaşma mesafesinin artırılması yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını belirtmişlerdir. Aşındırıcı oranının artırılması yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini talaş kaldırma oranını ise arttırdığını belirtmişlerdir [100].

Leeladhar ve arkadaşları, Alüminyum malzemenin ASJ kesilmesinde işleme parametrelerinin üç seviyeli L_9 deney düzenini Taguchi ile oluşturup optimizasyon analizini yapmışlardır. Aşındırıcı olarak 80 mesh garnet, 0,7 mm nozul çapı sabit olarak tutulmuştur. Değişken parametre olarak ise pompa basıncı (155, 224 ve 293 MPa), nozul yaklaşma mesafesi (2,5; 3,5 ve 4,5 mm), aşındırıcı akış oranı (270, 390 ve 510 g/dak) ve nozul ilerleme miktarı (90, 150 ve 210 mm/dak) kullanılmıştır. Çalışmalarında, düşük yüzey pürüzlülük değeri elde etmek için yüksek pompa

basıncı, düşük nozul ilerleme miktarı, düşük nozul yaklaşma mesafesi ve düşük aşındırıcı akış oranı olmasının gerektiğini tespit etmişlerdir. Talaş kaldırma oranının yüksek olması için ise; yüksek pompa basıncı, yüksek nozul yaklaşma mesafesi, orta seviye aşındırıcı akış oranı, düşük nozul ilerleme miktarını olduğunu belirtmişlerdir [101].

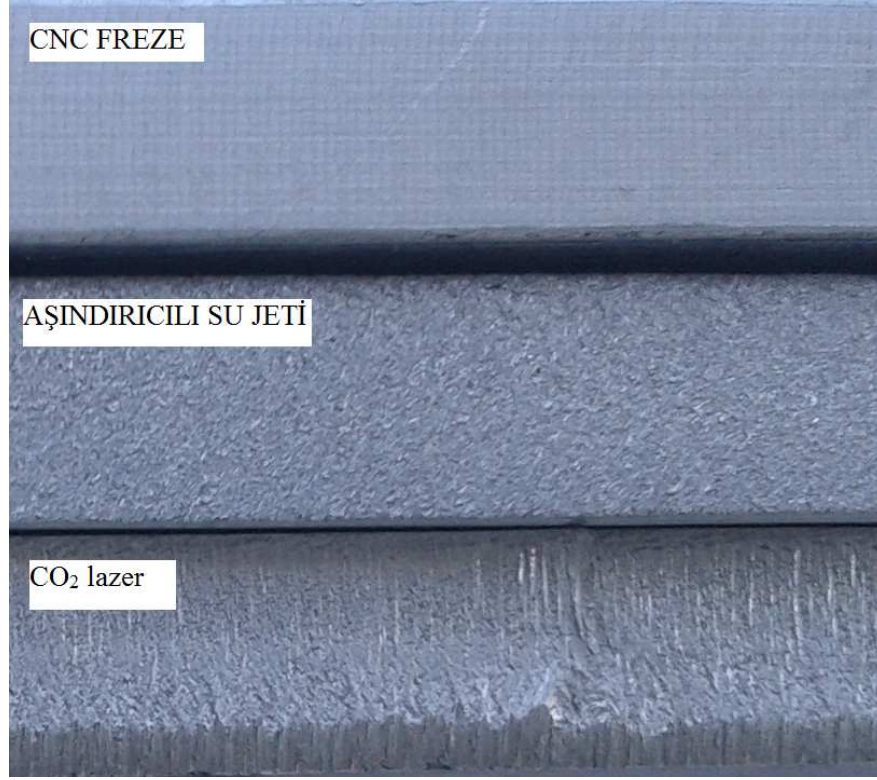
Zeleňák ve arkadaşları, ASTM B265-99 titanyum malzemeyi ASJ ve CO₂ lazer kesme yöntemleriyle işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır (Şekil 3.26). ASJ için işleme parametreleri olarak pompa basıncı (400 MPa), nozul çapı (0,8 mm), aşındırıcı akış oranı (m_a) (250, 400 g/dak), nozul yaklaşma mesafesi (4 mm), nozul ilerleme miktarı (350, 450 ve 550 mm/dak) ve aşındırıcı olarak 80 mesh garnet kullanmışlardır. CO₂ lazer için gaz basıncı (1,7 MPa), lazer gücü (P_L) (3500, 5000 W), nozul ilerleme miktarı (350, 450 ve 550 mm/dak), nozul yaklaşma mesafesi (1,5 mm), lazer çapı (2 mm), gaz akış hızı (800, 500 ve 500 mm/dak) ve nitrojen gazı (N₂) kullanmışlardır. En düşük ortalama yüzey pürüzlülük değerini (12 μ m) ASJ ile işlemede nozul ilerleme hızının 350 mm/dak'da elde edildiğini belirtmişlerdir. CO₂ lazerle kesimde yüzey pürüzlülük değeri 40 μ m elde edildiğini tespit etmişlerdir [102].

	CO ₂ lazer		ASJ
$v = 350$ mm/dak $P_L = 3500$ W		$v = 350$ mm/dak $m_a = 250$ g/dak	
$v = 450$ mm/dak $P_L = 3500$ W		$v = 450$ mm/dak $m_a = 250$ g/dak	
$v = 550$ mm/dak $P_L = 3500$ W		$v = 550$ mm/dak $m_a = 250$ g/dak	
$v = 350$ mm/dak $P_L = 5000$ W		$v = 350$ mm/dak $m_a = 400$ g/dak	
$v = 450$ mm/dak $P_L = 5000$ W		$v = 450$ mm/dak $m_a = 400$ g/dak	
$v = 550$ mm/dak $P_L = 5000$ W		$v = 550$ mm/dak $m_a = 400$ g/dak	

Şekil 3.26. ASJ ve CO₂ lazer ile işlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi görüntüsü [102].

Azmir ve Ahsan, fiber cam takviyeli kompozitlerin ASJ ile işlenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. İşleme parametreleri olarak; aşındırıcı tipi (garnet, alüminyum oksit), pompa basıncı (138, 207 ve 276 MPa), nozul yaklaşma mesafesi (1,5; 3 ve 4,5 mm), aşındırıcı akış oranı (150, 300 ve 450 g/dak) ve nozul ilerleme miktarı (90, 180 ve 270 mm/dak) olarak belirlemişlerdir. Taguchi ile üç seviyeli L_{18} deney düzenini oluşturmuşlardır. Parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki seviyelerini belirleyebilmek için varyans analizi yapmışlardır. Yüzey pürüzlülük değerini tahmin etmek için doğrusal regresyon analizi, yüzey pürüzlülüğü üzerinde eşit etkiye sahip parametrelerin pompa basıncı ve nozul ilerleme miktarı olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları işleme parametreleri optimizasyon analiz sonucu, ortalama yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması için; aşındırıcı olarak alüminyum oksit, pompa basıncı (276 MPa), nozul yaklaşma mesafesinin (1,5 mm), aşındırıcı akış oranının (450 g/dak) ve nozul ilerleme miktarının (90 mm/dak) değerlerinde olması gerektiğini belirtmişlerdir [103].

Kartal ve arkadaşları, CO₂ lazer tezhagı, aşındırıcı su jeti ve CNC freze imalat yöntemlerini kullanarak Alüminyum 6061 T6 malzemesinden standart çekme testi numunelerini hazırlamışlardır. Yapmış oldukları çalışmada farklı işleme yöntemleriyle hazırlanan çekme testi numunesinin mekanik özelliklerinin ve yüzey özelliklerinin nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla deneyler yapmışlardır. Hazırlanan çekme testi numunelerinden işlenen yüzeyden hem mikro sertlik değerlerini hemde ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Çalışma sonucunda, mukavemet değeri en yüksek ve en düşük mikro sertlik değerlerine AWJ ile işlemede elde etmişlerdir. CO₂ Lazer kesim ile hazırlanan numunelerde hem yüzey pürüzlülük değerleri hemde mikro sertlik değerleri yüksek çıktığı bildirilmiştir. Aşındırıcılı su jeti ile kesim metodunda, ortalama pürüzlülük değerleri lazer kesime göre % 41 daha düşük, frezeleme yöntemine göre % 44 yüksek çıktığını tespit etmişlerdir. Ayrıca aşındırıcılı su jeti ile işleme yöntemi ısı etki oluşturmadığı için işlenen yüzeylerin mikro sertlik değerlerinde değişime neden olmadığını bildirmişlerdir. Çekme testi hazırlanmasında yöntem tercih sırası aşındırıcılı su jeti, frezeleme ve lazer kesim yöntemi şeklinde olabileceğini önermişlerdir (Şekil 3.27) [104].



Şekil 3.27. Alüminyum 6061 T6 malzemesinden CO₂ lazer, aşındırıcı su jeti ve CNC freze imalat yöntemlerini kullanarak hazırlanan çekme testi numuneleri görüntüsü [104].

3.4. LİTERATÜR DEĞERLENDİRMESİ

ASJT işleminde tornalama deney düzeneğinin kullanılması kaçınılmazdır. Yapılan literatür araştırmasında, tornalama deney düzeneği kullanılarak kesme ve erozyon oluşturarak işleme yapılan farklı deneysel çalışmalar mevcuttur. Fakat tüm deney çalışmalarda kullanılan tornalama düzenekleri mekanizma olarak birbirlerine benzerlik gösterdiği ve deney düzeneklerinde torna aynası basınçlı su ve aşındırıcı partiküllere karşı koruma muhafazasız kullanıldığı tespit edilmiştir. Torna aynasının muhafazasız kullanılması zor olan tornalama işlemini daha da zorlaştırmaktadır.

İşleme sırasında, torna aynası devri, nozul ilerleme miktarı, nozul yaklaşma mesafesi, aşındırıcı tipi ve boyutu, nozul çapı, aşındırıcı akış oranı, pompa basıncı gibi parametreler iş parçası yüzey pürüzlülüğü, dalgalılığı ve talaş kaldırma oranına etkileri olmaktadır.

Soğuk işleme olarak tanımlanan ASJ ve ASJT ile işleme, iş parçası üzerinden erozyon oluşturarak talaş kaldırma esnasında kesme bölgesinde ısı oluşmamaktadır. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşmayan ısı, talaş kaldırma işleminde önemli bir faktör olup, işleme performansı ve iş parçası yüzey kalitesi açısından büyük bir öneme sahiptir.

ASJ ve ASJT ile işlenmesi zor, karmaşık, minyatür metal veya metal olmayan malzemeler kolaylıkla işlenebilmektedir.

Aşındırıcı olarak; garnet, silisyum karbür tozu ve alüminyum oksit kullanılmaktadır. Yaygın olarak 80 mesh boyutunda garnet kullanılmıştır.

Pompa basıncının artırılması yüzey pürüzlülük ve dalgalılık değerlerinin yüksek olmasına neden olmaktadır.

Deneysel sonuçta elde edilen değerler ile matematiksel model sonucunda tahmin edilen değerlerin birbirine yakın olduğu belirtilmiştir.

İşleme parametrelerinden nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesinin artması ortalama yüzey pürüzlülüğünün artışına neden olduğu, pompa basıncının ve aşındırıcı akış oranının artırılması talaş kaldırma oranında artışa neden olmaktadır.

ASJ ile tornalamada talaş kaldırma hacmi ve işleme derinliğine torna aynası devri, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı ve nozul yaklaşma mesafesi etkili olmaktadır.

ASJT işleminde işleme teknikleri olarak Ofset mod ve Radyal mod kullanıldığı Ofset mod iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığı üzerinde daha etkili olmaktadır.

ASJ ve ASJT işleminde nozul yüksekliğinin artışına bağlı olarak jette huzme etkisi oluşmaktadır.

Literatürden edilen kazanımlar sonucunda, KMT marka ASJ tezgâhında kullanılmak üzere torna aynası muhafazalı deney düzeneği imalatı gerçekleştirilmiştir. Yine

endüstride kullanımı yaygın olmasına rağmen bilimsel çalışmalarda pek kullanılmayan 120 mesh boyutunda garnet aşındırıcı ve beş farklı işleme parametreleri kullanılmıştır. İşleme parametrelerinin AISI 1050 çeliği iş parçası üzerinde erozyon oluşturarak talaş kaldırma işlemi sonrasında iş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ile talaş kaldırma oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu anlamda yapılan çalışma, literatürde az sayıda olan çalışmalara zenginlik katmaktadır. Çalışmada, işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerinin değerlendirilmesi için tam faktöriyel analizi, varyans analizi (Anova), regresyon analizi, üç boyutlu yüzey grafik analizleri ve optimizasyonu yapılmıştır.

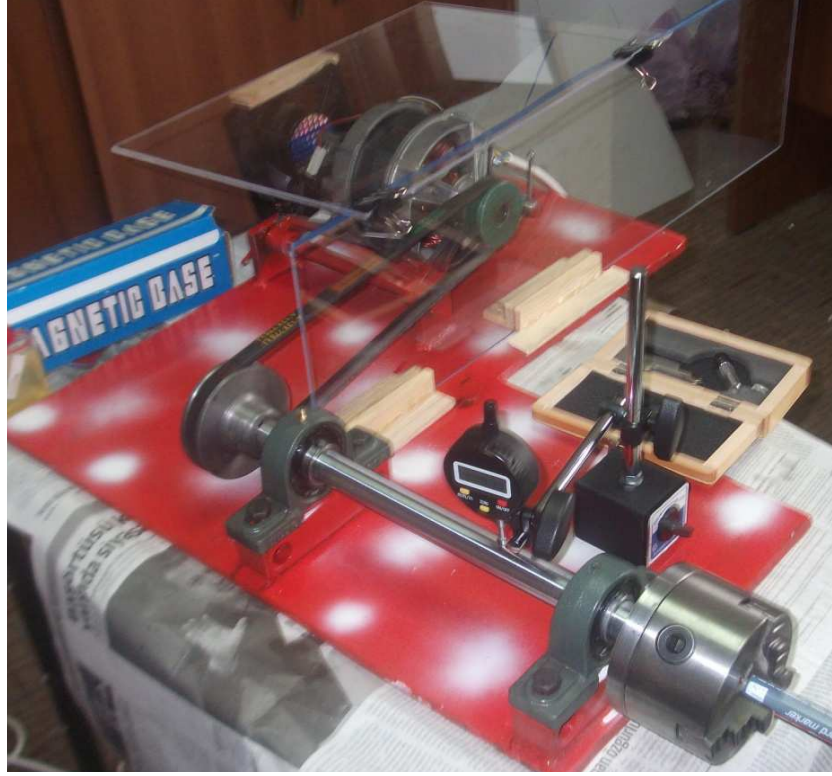
BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOD

4.1. AŞINDIRICILI SU JETİ TORNA TEZGÂHI TASARIMI

Çalışmada, aşındırıcılı su jeti ile tornalama (ASJT) yapabilmek için torna deney düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan torna deney düzeneği; doğrudan oluşturulmamıştır. İlk önce iki farklı torna düzeneği oluşturulmuş ve oluşturulan iki farklı deney düzeneklerinin kusurlu yönleri giderilerek üçüncü torna deney düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan üç farklı deney düzeneğinde 100 mm çapında üç ayaklı torna aynası kullanılmıştır. Oluşturulan her bir torna deney düzeneği, su jeti ortamında denenmiştir. Oluşturulan her bir deney düzeneği yapılış sırasına göre Model 1, Model 2 ve Model 3 olarak isimlendirilmiştir.

Oluşturulan Model 1 torna deney düzeneği Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Düzenekte asenkron motor kullanılmıştır. Gerekli besleme gerilimi BT - 138 transistörlü 220 V ayarlanabilir elektronik devre kullanılarak elde edilmiştir. Ayarlanabilir elektronik kontrol devresi Şekil 4.2’de verilmiştir. Hareket iletimi kayış kasnak ve kamalı mil bağlantısı kullanılarak oluşturulmuş olup fener mili olarak yüzeyi sertleştirilmiş AISI 304 paslanmaz çelik malzemeden yapılmış mil kullanılmıştır. Düzenekte ayrıca, aksel sapmaları sönmölemek amacıyla 20 mm iç çap değerine sahip yataklı rulman kullanılmıştır. Düzeneğin aksel sapmasını tespit edebilmek için 0,001 mm hassasiyete sahip dijital komparatör kullanılmıştır. Oluşturulan bu düzenekte, ölçülen fener mili ve torna aynası aksel sapma değeri, 0,002 mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Model 1 tip su jeti tornalama düzeneği gösterimi.



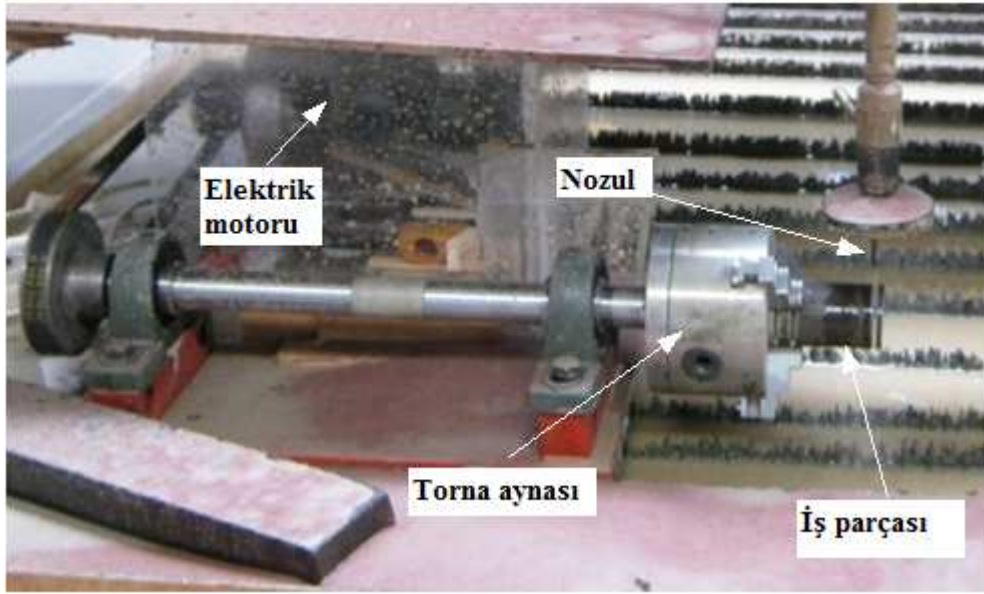
Şekil 4.2. Motor devri için kullanılan ayarlanabilir elektronik kontrol devresi görünümü.

Ancak, çalışmada Model 1 ilk deney seti olması nedeniyle bazı dezavantajlara sahip olmuştur. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmıştır;

- Elektrik motorunun su seviyesinde oluşu nedeniyle, su jeti havuzunun dalgalanması ve dalgalanmaya bağlı olarak düzeneği su basması,

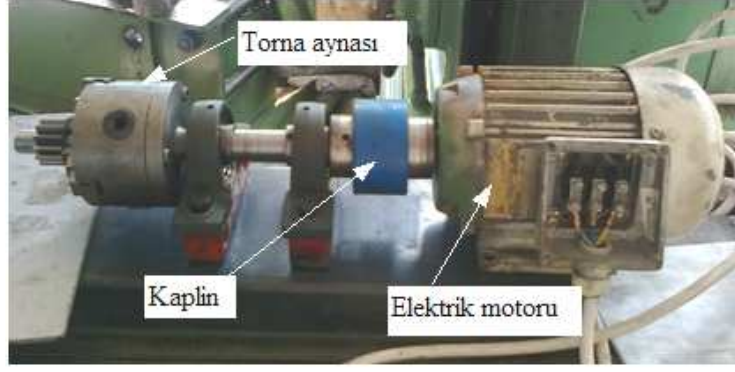
- Torna aynası dönüş yönünün, su jeti ile aynı yönde olması durumunda torna devri artmış, su jeti ile ters yönde döndüğünde ise torna aynasının devrinde düşüş gözlemlenmiştir. Söz konusu devir değerlerindeki değişimler lazer devir ölçer ile tespit edilmiştir.
- Model 1 torna düzeneğinin aşındırıcı su jeti ortamında denenmesi esnasında (Şekil 4.3) torna aynasının aşındırıcı kumla olan teması sonucu kumlar, torna aynası ayakları arasına girmiş ve torna aynasını sıkıştırmıştır.

Ön denemeler de elde edilen veriler doğrultusunda ASJT işleminde Model 1'in uygun bir model olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.3. Model 1 tip torna düzeneğinin ASJ tezgahında deneme anı görüntüsü.

Model 1'de tespit edilen dezavantajlar dikkate alınarak Model 2 torna düzeneği oluşturulmuştur. Oluşturulan Model 2 torna düzeneği, Şekil 4.4'de verilmiştir. Model 2 torna düzeneğinde elektrikli motor ile torna aynası aynı eksenel doğrultuda tasarlanmıştır. Motor ile düzenek arasına hareket iletimi için kaplin kullanılmıştır. Model 2 düzeneğine gezer punta ilave edilerek, torna aynasına daha uzun iş parçası bağlama olanağı sağlanmıştır. Böylelikle uzun parçaların işlenmesi açısından çalışma aralığı genişletilmiştir.

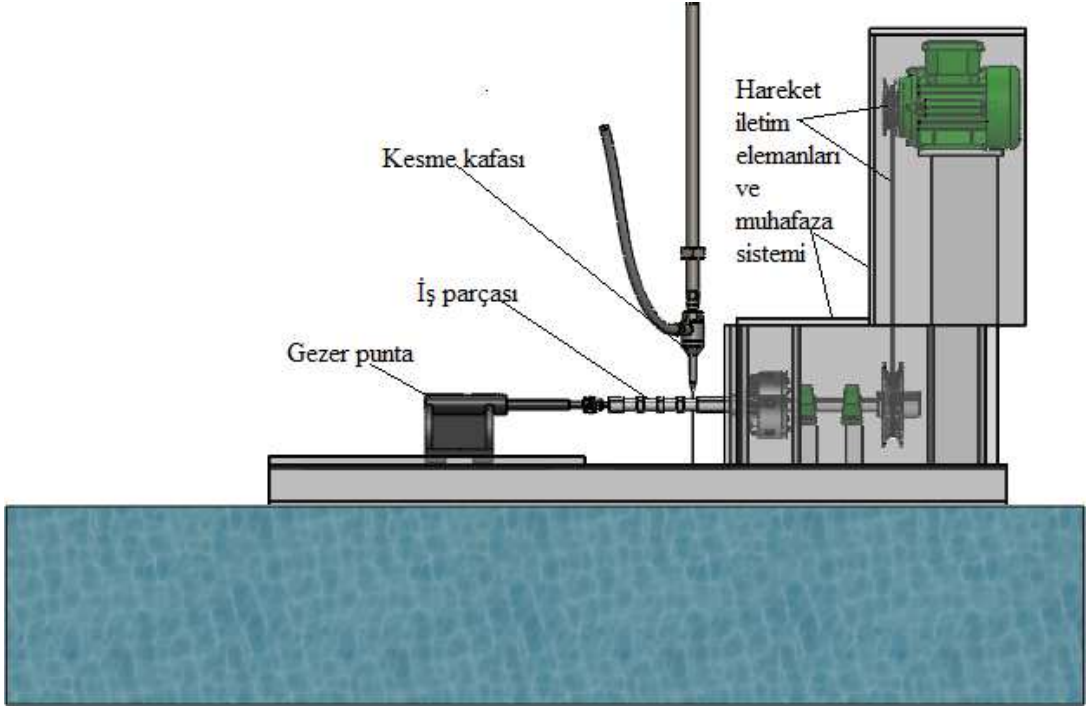


Şekil 4.4. Model 2 tip tek eksenli kaplinli torna düzeneği gösterimi.

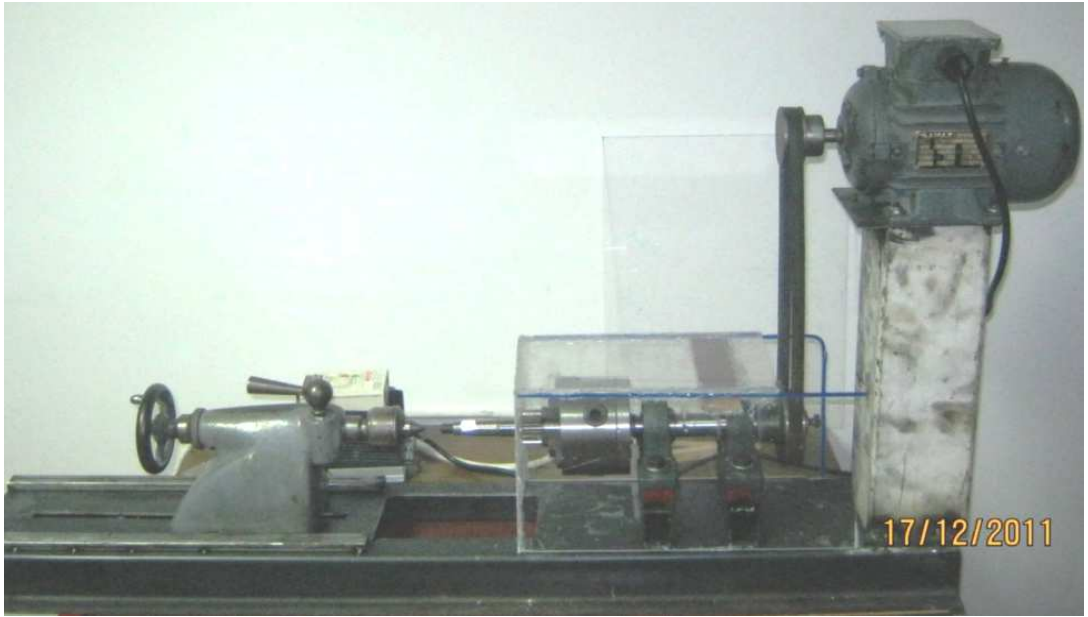
Şekil 4.4'de verilmiş olan Model 2 torna düzeneğinin ön deneme çalışmalarında Model 1'e göre avantaj ve dezavantajları tespit edilmiştir.

Avantajı, motor seviyesinin ve torna aynasının su jeti havuz seviyesinden yüksek olmasıdır. Motor seviyesi ve torna aynasının su jeti havuzundan yüksek olması nedeniyle tezgah su dalgaları ve aşındırıcı toz zerreciklerinden korunmuştur. Dezavantajı ise Model 1'de olduğu gibi aksenal sapmanın olmasıdır. Aksenal sapmanın kontrolü dijital komparatör kullanılarak yapılmıştır. Aksenal sapma 0,02 mm olarak tespit edilmiştir. Aksenal sapma değeri sistemin sürekliliği ve su jeti tormalama prosesi açısından kabul edilemez bir değerde olmuştur. Bu nedenle, Model 2 torna düzeneğinin ASJT işleminde kullanılması için uygun olmadığı kanaatine varılmıştır.

Model 1 ve Model 2 torna düzeneklerinin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak, Model 3 hibrit özellikli torna düzeneği önce üç boyutlu bilgisayar destekli tasarım (CAD) ortamında tasarlanmıştır (Şekil 4.5). Üç boyutlu olarak tasarlanan Model 3 hibrit torna düzeneğinin daha sonra yapımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.5. Üç boyutlu tasarlanan Model 3 hibrit torna deney düzeneği görüntüsü.



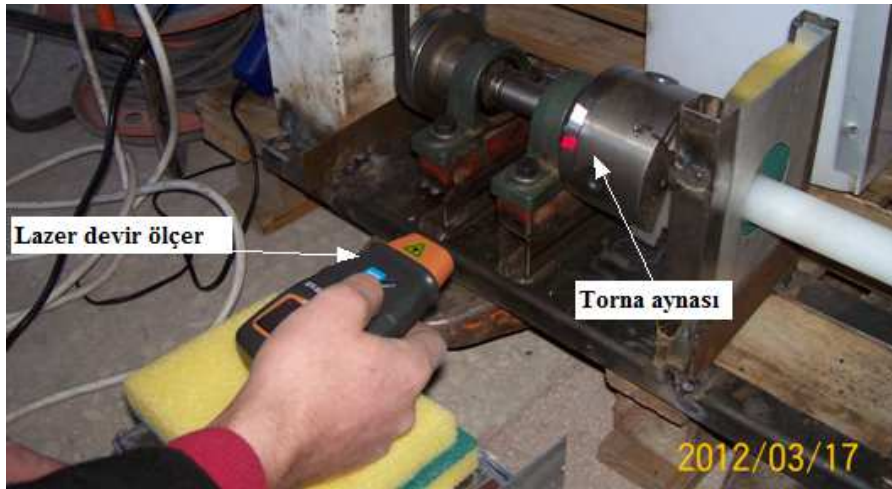
Şekil 4.6. İmalatı gerçekleştirilen Model 3 hibrit torna deney düzeneği görünümü.

Model 3 torna düzeneğinde, diğer modellerden farklı olarak 0,37 KW gücünde üç fazlı asenkron motor, motor hız kontrolünü sağlamak için ATV 12 380 V – 220 V kontrol kartı kullanılmıştır. Motor hız kontrol kartının en önemli özelliği, üç fazlı motoru 220 V şebeke gerilimi ile kontrol ederek, motorun dönüş yönü ve dönüş hızı

gibi ayarlamaların ve motorun tork değerini sabit bir değerde tutabilmesidir. Hız kontrol kartının sağladığı bir diğer özellik ise motorun hızını sabitleyebilmesidir. Motor hızının sabitlenebilmesi düzenek açısından çok önemlidir. Torna aynasının dönüş yönü, hız kontrol kartı üzerinde yer alan bir ayar düğmesi ile yapılmaktadır. Torna aynası devir ayar hızlarının kontrolü için lazer devir ölçüm cihazı (Şekil 4.7a) kullanılmıştır. Torna aynası devir hızı ayarları Altivar 12 (220-380 V) hız ayar cihazı Şekil 4.7b’de kullanılmıştır. Model 3 torna düzeneğinin deney öncesi hız kontrollerinin yapım sürecini gösteren görüntü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. a) Lazer devir ölçer, b) Altivar 12 (220-230 V) elektrik motoru hız ayar cihazı görünümü.



Şekil 4.8. Torna aynası dönüş hızı kontrollerinin yapım sürecinin görüntüsü.

Model 1 ve Model 2'nin avantaj sayılan özellikleri, Model 3 torna düzeneğine aktarılarak, model üzerinde iyileşme sağlanmış ve ASJT için en uygun tornalama düzeneği model yapısı elde edilmiştir.

4.2. DENEYLERDE KULLANILAN AŞINDIRICI MALZEME

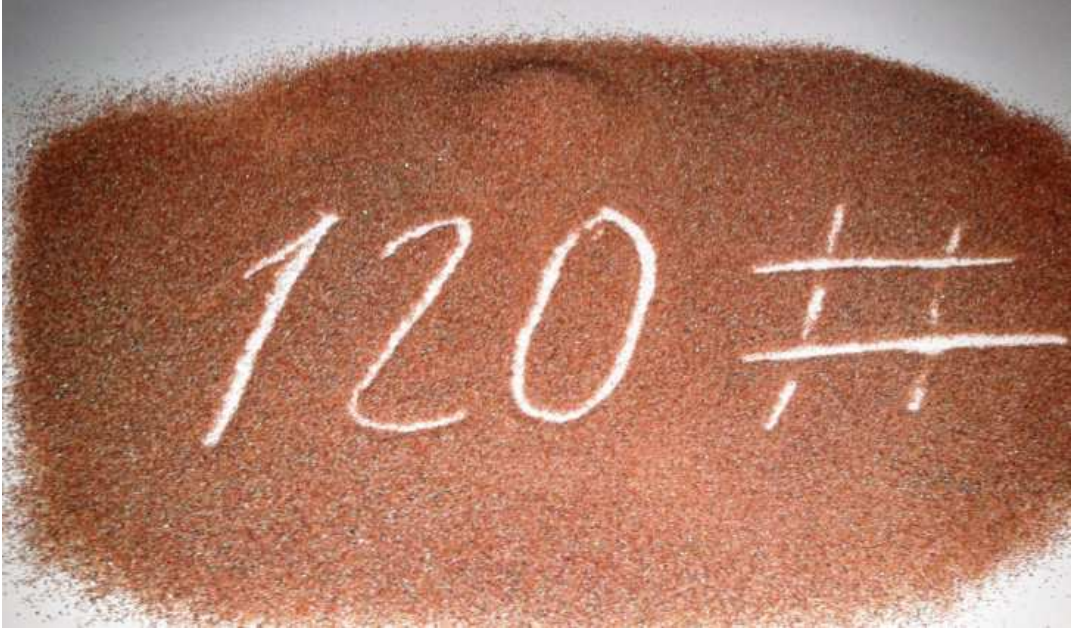
ASJT ile işlemede, aşındırıcı olarak garnet kullanılmıştır. Garnet yeryüzünde doğal olarak bulunan bir mineraldir. Doğadan çıkarılan mineraller zenginleştirme işlemlerinden geçirilerek teknolojik anlamda kullanılabilir hale getirilmektedir [103-105-107]. Bu çalışmada, hem iyi bir yüzey elde etmek hem de kaldırılan talaş hacminin daha yüksek olabilmesi açısından sanayide yaygın kullanıma sahip boyutu 120 mesh olan garnet aşındırıcı seçilmiş ve kullanılmıştır. 120 mesh boyutlu aşındırıcı garnet'in kimyasal özellikleri Çizelge 4.1'de, mekanik özellikleri ise Çizelge 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.9'da ise 120 Mesh garnet tipi aşındırıcının makro görünümü verilmiştir. Garnet tipi aşındırıcıların boyutları 20, 30, 36, 46, 60, 80, 100, 120, 150 ve 200 Mesh olarak bulunabilmektedir [103-105].

Çizelge 4.1. 120 Mesh Aşındırıcı garnetin kimyasal özellikleri [105-107].

Bileşen	Ağırlık (%)
SiO ₂	30-40
MgO	5-10
Fe ₂ O ₃	30-35
CaO	2
Al ₂ O ₃	20-25
MnO	1

Çizelge 4.2. 120 Mesh aşındırıcı garnetin mekanik özellikleri [105-107].

Özellik	Değer
Sertlik	7,5 Mohs
Yoğunluk	4,1 g/cm ³
Erime Noktası	1315 °C



Şekil 4.9. 120 Mesh garnet aşındırıcının makro görünümü.

4.3. DENEYLERDE KULLANILAN İŞ PARÇASI

Deneylerde $\text{Ø}30 \times 240$ mm boyutlarında AISI 1050 çeliği kullanılmıştır (Şekil 4.10). İş parçasına ait mekanik özellikler Çizelge 4.3'te kimyasal özellikler ise Çizelge 4.4.'te verilmiştir.



Şekil 4.10. AISI 1050 çeliğinden hazırlanmış deney numune görüntüsü.

Çizelge 4.3. Deney numunesinin (AISI 1050) mekanik özellikleri [108].

Sertlik (BSD)	Kopma dayanımı (N/mm ²)	Akma sınırı (N/mm ²)	Kopma uzaması (%)
197	580	690	10

Çizelge 4.4. Deney numunesinin (AISI 1050) kimyasal bileşimi (% ağırlık) [108].

C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Sn
0.50	0.64	0.24	0.010	0.005	0.12	0.01	0.07	0.014	0.011

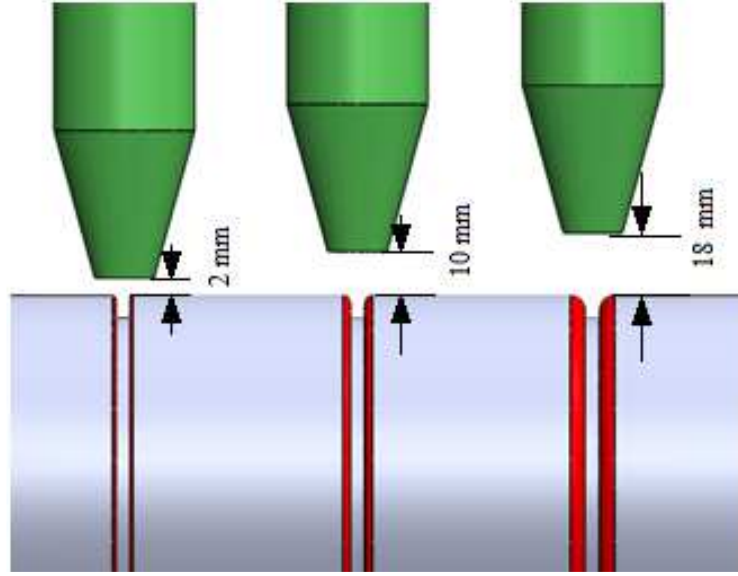
Deney numunesi olarak AISI 1050 çeliğinin seçilmesinin nedeni, endüstriyel ve teknolojik uygulamalarda yaygın kullanıma sahip olması ve diğer çelik türlerine nazaran işlenebilirlik özelliklerinin daha yüksek olmasıdır.

4.4. İŞLEME PARAMETRELERİ

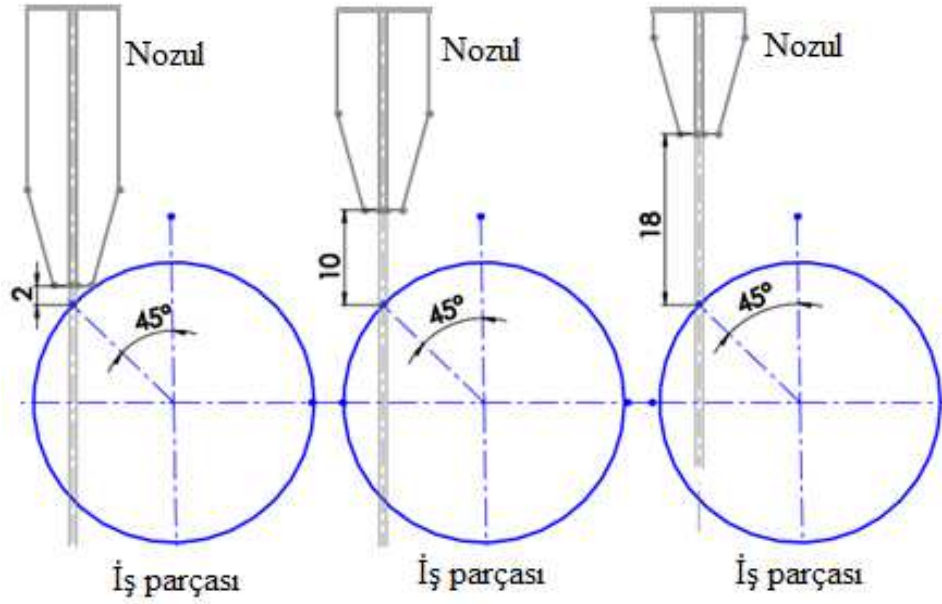
İşleme parametreleri olarak, nozul çapı NÇ (mm), nozul ilerleme miktarı NİM (mm/dak), aşındırıcı akış oranı AAO (g/dak), nozul yaklaşma mesafesi NYM (mm) ve torna devri TD (dev/dak) ile sabit pompa basıncı (350 MPa) kullanılmıştır. İşleme parametrelerinin seviyeleri, Çizelge 4.5’de verilmiştir. Nozulun iş parçasına yaklaşma mesafesinin yandan görünümü Şekil 4.11’de önden görünümü ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. ASJT işleminde kullanılan parametreler ve seviyeleri.

Sembol	İşleme Parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
NÇ	Nozul çapı	mm	0.75	1.3	
NİM	Nozul ilerleme miktarı	mm/dak	5	25	45
AAO	Aşındırıcı akış oranı	g/dak	50	200	350
NYM	Nozul yaklaşma mesafesi	mm	2	10	18
TD	Torna Devri	dev/dak	500	1500	2500



Şekil 4.11. Nozul yaklaşma mesafesinin görünümü.



Şekil 4.12. İş parçasının önden görünümünde nozul yaklaşma mesafesi konumları görünümü.

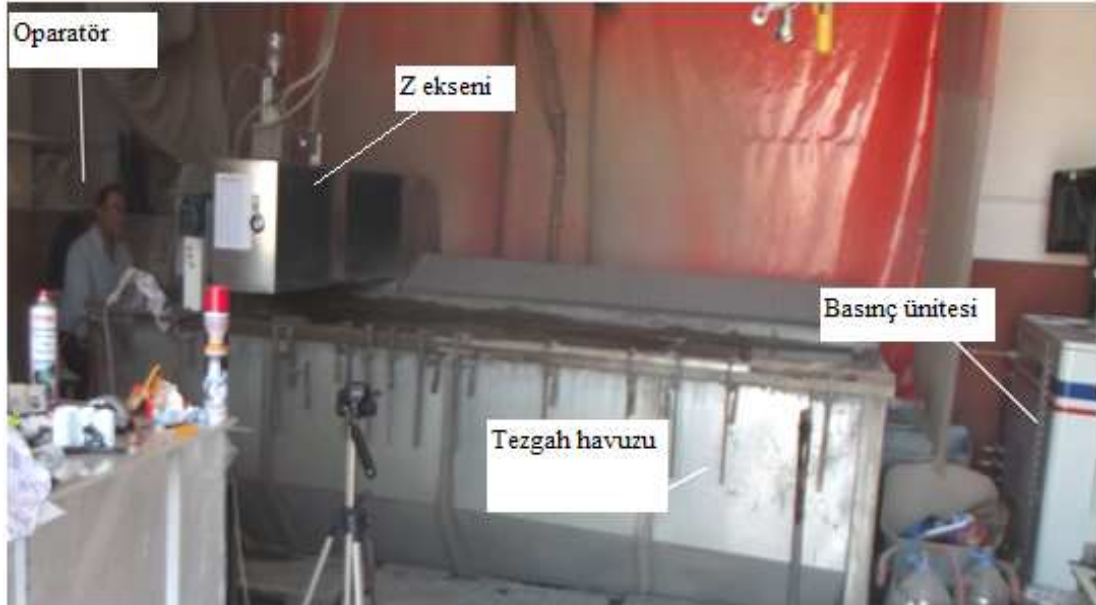
ASJT işleminde torna aynası dönüş yönünün belirlenmesinde ön deneyler yapılmıştır. Yapılan ön deneyler sonucunda, torna aynası dönüş yönünün ASJ ile aynı yönde olması tespit edilmiştir. Zıt yönlü olması durumunda iş parçası yüzeyinde makro düzeyde bozulmalar oluşmuştur. Ön deneyler sonucunda, zıt yönlü çalışmada elde edilen iş parçası görüntüsü Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. AISI 1050 malzemenin ASJT ile işlenmesinde, iş parçasının dönüş yönünün ASJ ile zıt yönlü olmasının durumunda iş parçası yüzeyinde meydana gelen yüzey bozuklukları görüntüsü.

4.5. AŞINDIRICILI SU JETİ TEZGÂHI

ASJT işleminin yapıldığı KMT marka ASJ tezgâhı görüntüsü Şekil 4.14'te gösterilmiştir. ASJ tezgâhında KMT marka intensifier tipi pompa kullanılmıştır (Şekil 4.15). Kullanılan basınç ünitesi genel görünümü Şekil 4.16'da gösterilmiştir. KMT basınç ünitesine ait teknik özellikler Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.14. Deneilerin yapıldığı aşındırıcı su jeti tezgâhı genel görüntüsü.



Şekil 4.15. KMT tipi intensifier pompa görüntüsü [109].



Şekil 4.16. KMT intensifier pompalı aşındırıcılı su jeti basınç ünitesi dış görüntüsü [109].

Çizelge 4.6. KMT basınç ünitesi teknik özellikleri [109].

Pompa Basıncı	Motor Gücü	Su tüketimi	Orifis ölçüsü
413 MPa	50 HP - 37 KW	3.8 lt/dak.	0.35 mm

4.6. TAM FAKTÖRİYEL (EŞLEŞMELİ) DENEY TASARIMI

Tam faktöriyel analiz, birden çok parametrenin farklı seviyelerde ele alınarak etkilerinin analiz edildiği yöntemdir. Prensip olarak tam faktöriyel deney tasarımı, parametrelerin karşılıklı eşleşmeli olarak deney çıktısına olan etkisini tespit etmek için kullanılan tasarım yöntemidir.

Tam faktöriyel yöntemine göre deney sayısını belirlemede denklem 4.1 kullanılmıştır.

$$N = n^k \quad (4.1)$$

N deney sayısını, n seviye sayısını, k ise parametre sayısını ifade etmektedir.

Bu çalışmada, tam faktöriyel yöntemine göre toplam $(2^1 \times 3^4) = 2 \times 81 = 162$ deney sayısı belirlenmiştir. Tam faktöriyel deney sırası ve düzeni Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Tam faktöriyel deney düzeni.

	Nozul Çapı (mm)	Nozul İlerleme Miktarı (mm/dak)	Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)	Nozul Yaklaşma Mesafesi (mm)	Torna Devri (dev/dak)
Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD
1	0,7	5	50	2	500
2	0,7	5	50	2	1500
3	0,7	5	50	2	2500
4	0,7	5	50	10	500
5	0,7	5	50	10	1500
6	0,7	5	50	10	2500
7	0,7	5	50	18	500
8	0,7	5	50	18	1500
9	0,7	5	50	18	2500
10	0,7	5	200	2	500
11	0,7	5	200	2	1500
12	0,7	5	200	2	2500

Çizelge 4.7. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD
13	0,7	5	200	10	500
14	0,7	5	200	10	1500
15	0,7	5	200	10	2500
16	0,7	5	200	18	500
17	0,7	5	200	18	1500
18	0,7	5	200	18	2500
19	0,7	5	350	2	500
20	0,7	5	350	2	1500
21	0,7	5	350	2	2500
22	0,7	5	350	10	500
23	0,7	5	350	10	1500
24	0,7	5	350	10	2500
25	0,7	5	350	18	500
26	0,7	5	350	18	1500
27	0,7	5	350	18	2500
28	0,7	25	50	2	500
29	0,7	25	50	2	1500
30	0,7	25	50	2	2500
31	0,7	25	50	10	500
32	0,7	25	50	10	1500
33	0,7	25	50	10	2500
34	0,7	25	50	18	500
35	0,7	25	50	18	1500
36	0,7	25	50	18	2500
37	0,7	25	200	2	500
38	0,7	25	200	2	1500
39	0,7	25	200	2	2500
40	0,7	25	200	10	500
41	0,7	25	200	10	1500
42	0,7	25	200	10	2500
43	0,7	25	200	18	500
44	0,7	25	200	18	1500
45	0,7	25	200	18	2500
46	0,7	25	350	2	500
47	0,7	25	350	2	1500
48	0,7	25	350	2	2500
49	0,7	25	350	10	500
50	0,7	25	350	10	1500
51	0,7	25	350	10	2500
52	0,7	25	350	18	500
53	0,7	25	350	18	1500
54	0,7	25	350	18	2500
55	0,7	45	50	2	500
56	0,7	45	50	2	1500

Çizelge 4.7. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD
57	0,7	45	50	2	2500
58	0,7	45	50	10	500
59	0,7	45	50	10	1500
60	0,7	45	50	10	2500
61	0,7	45	50	18	500
62	0,7	45	50	18	1500
63	0,7	45	50	18	2500
64	0,7	45	200	2	500
65	0,7	45	200	2	1500
66	0,7	45	200	2	2500
67	0,7	45	200	10	500
68	0,7	45	200	10	1500
69	0,7	45	200	10	2500
70	0,7	45	200	18	500
71	0,7	45	200	18	1500
72	0,7	45	200	18	2500
73	0,7	45	350	2	500
74	0,7	45	350	2	1500
75	0,7	45	350	2	2500
76	0,7	45	350	10	500
77	0,7	45	350	10	1500
78	0,7	45	350	10	2500
79	0,7	45	350	18	500
80	0,7	45	350	18	1500
81	0,7	45	350	18	2500
82	1,3	5	50	2	500
83	1,3	5	50	2	1500
84	1,3	5	50	2	2500
85	1,3	5	50	10	500
86	1,3	5	50	10	1500
87	1,3	5	50	10	2500
88	1,3	5	50	18	500
89	1,3	5	50	18	1500
90	1,3	5	50	18	2500
91	1,3	5	200	2	500
92	1,3	5	200	2	1500
93	1,3	5	200	2	2500
94	1,3	5	200	10	500
95	1,3	5	200	10	1500
96	1,3	5	200	10	2500
97	1,3	5	200	18	500
98	1,3	5	200	18	1500
99	1,3	5	200	18	2500
100	1,3	5	350	2	500

Çizelge 4.7. (devam ediyor).

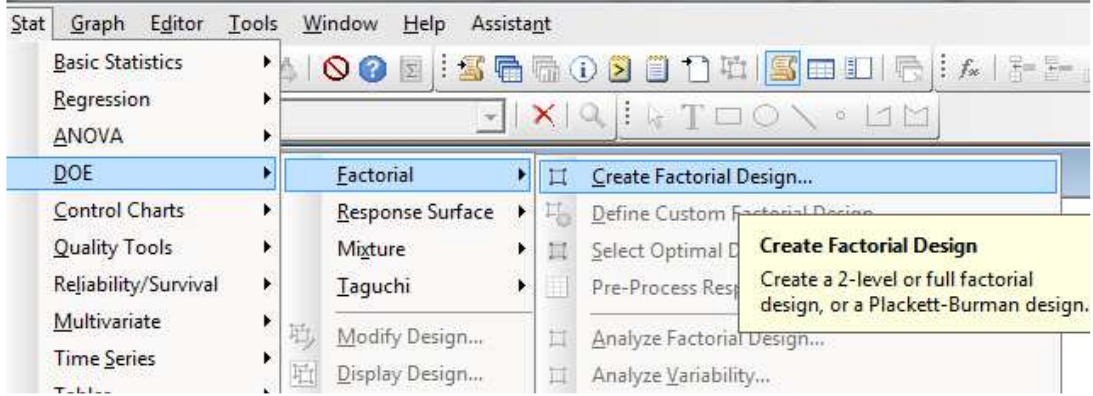
Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD
101	1,3	5	350	2	1500
102	1,3	5	350	2	2500
103	1,3	5	350	10	500
104	1,3	5	350	10	1500
105	1,3	5	350	10	2500
106	1,3	5	350	18	500
107	1,3	5	350	18	1500
108	1,3	5	350	18	2500
109	1,3	25	50	2	500
110	1,3	25	50	2	1500
111	1,3	25	50	2	2500
112	1,3	25	50	10	500
113	1,3	25	50	10	1500
114	1,3	25	50	10	2500
115	1,3	25	50	18	500
116	1,3	25	50	18	1500
117	1,3	25	50	18	2500
118	1,3	25	200	2	500
119	1,3	25	200	2	1500
120	1,3	25	200	2	2500
121	1,3	25	200	10	500
122	1,3	25	200	10	1500
123	1,3	25	200	10	2500
124	1,3	25	200	18	500
125	1,3	25	200	18	1500
126	1,3	25	200	18	2500
127	1,3	25	350	2	500
128	1,3	25	350	2	1500
129	1,3	25	350	2	2500
130	1,3	25	350	10	500
131	1,3	25	350	10	1500
132	1,3	25	350	10	2500
133	1,3	25	350	18	500
134	1,3	25	350	18	1500
135	1,3	25	350	18	2500
136	1,3	45	50	2	500
137	1,3	45	50	2	1500
138	1,3	45	50	2	2500
139	1,3	45	50	10	500
140	1,3	45	50	10	1500
141	1,3	45	50	10	2500
142	1,3	45	50	18	500

Çizelge 4.7. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD
143	1,3	45	50	18	1500
144	1,3	45	50	18	2500
145	1,3	45	200	2	500
146	1,3	45	200	2	1500
147	1,3	45	200	2	2500
148	1,3	45	200	10	500
149	1,3	45	200	10	1500
150	1,3	45	200	10	2500
151	1,3	45	200	18	500
152	1,3	45	200	18	1500
153	1,3	45	200	18	2500
154	1,3	45	350	2	500
155	1,3	45	350	2	1500
156	1,3	45	350	2	2500
157	1,3	45	350	10	500
158	1,3	45	350	10	1500
159	1,3	45	350	10	2500
160	1,3	45	350	18	500
161	1,3	45	350	18	1500
162	1,3	45	350	18	2500

4.7. KULLANILAN İSTATİSTİK PROGRAMI

İşleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerinin değerlendirilmesi için tam faktöriyel analizi, varyans analizi (Anova), regresyon analizi, yüzey grafik analizlerinin ve optimizasyonun yapılması için Minitab 17.0 deneme sürüm istatistik paket programı kullanılmıştır. Tam faktöriyel analiz için Minitab Stat>DOE> Factorial>Define Create Factorial Design opsiyonu takip edilmiş ve tam faktöriyel analiz gerçekleştirilmiştir. Menü sekmelerine ait gösterim Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Minitab 17.0 paket programı ile tam faktöriyel analizin oluşturulma süreci görüntüsü [110,111].

4.8. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM CİHAZI

ASJT ile işlenen AISI 1050 çeliği numunelerinin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümleri için masa üstü sütunlu ve yazılı çıktı alma özelliklerine sahip “Mitutoyo” SJ-301 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı (Şekil 4.18) kullanılmıştır [112].



Şekil 4.18. Mitutoyo (SJ-300) masaüstü sütunlu yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görüntüsü [112].

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan ölçüm cihazına ait teknik özellikler Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Mitutoyo marka (SJ-300) yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri [112].

Model	SJ-301
Tarama hızı	0.25, 0.5 mm/s
Tarama kuvveti	4 mN 0.75 mN
İğne uç yarıçapı	2 μm , 5 μm
Ölçüm aralığı	350 μm (-200 μm ... +150 μm)
Filtre	Gaussian
Örnekleme aralığı	0.25, 0.8, 2.5 (mm)
Ölçüm genişliği	0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8 (mm)
Ölçülebilen parametreler	Ra, Rz, Rmax

Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde sadece ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.19). Ölçümler numunenin orta bölümünde dört farklı noktadan alınmıştır.



Şekil 4.19. ASJT ile işlenen AISI 1050 çeliğinin yüzey pürüzlülük ölçümü gösterimi.

4.9. TALAŞ KALDIRMA ORANININ ÖLÇÜMÜ

ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği deney numunelerinin talaş kaldırma oranını hesaplamak için çap ölçümleri 0,001 mm hassasiyete sahip dijital kumpas ile dört farklı noktadan ölçülmüştür.

Talaş kaldırma oranı için her bir tornalama işleminden sonra malzeme üzerinden 0,001 mm hassasiyete sahip dijital kumpas ile çap ölçümü alınmış ve tornalamadan önceki çap değerine göre hesap yapılarak talaş kaldırma oranı hesaplanmıştır.

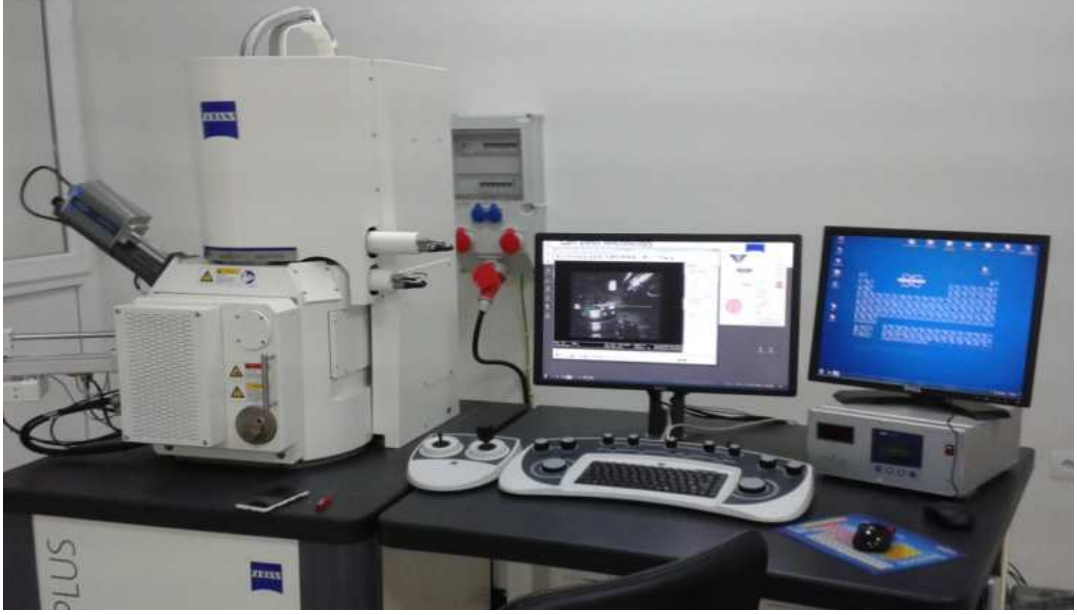
Talaş kaldırma oranının hesaplanmasında denklem 4.2 kullanılmıştır.

$$TKO_i = \left(\frac{\pi(D_i^2 - D_{i+1}^2)}{4} \right) h / 60 \quad (4.2)$$

Eşitlikte, D_i i. tornalama öncesi çapı, D_{i+1} i. tornalama sonrası çapı, h boyuna tornalanan yüzey mesafesini ifade etmektedir.

4.10. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İLE GÖRÜNTÜ ANALİZLERİ VE ELEMENT DAĞILIM (EDS) ANALİZİ

ASJT ile işlenmiş numunelerin işlenen yüzeylerdeki mikro görüntüleri Şekil 4.20'de gösterilen Carl Zeiss Ultra Plus Fesem marka SEM (Scanning Electron Microscope, Taramalı Elektron mikroskobu) ile analiz edilmiştir. Bu çalışmada, SEM görüntüleri alınırken Çizelge 4.9'da verilen deney numara ve özelliği dikkate alınmıştır. Ayrıca ASJT ile işlenen numunelerin element dağılımı ve iş parçasına saplanan aşındırıcı partiküllerin tanımlaması ise Enerji dağılımlı x-ışınları analizi (EDS) (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) analizi yine Şekil 4.20'da gösterilen Carl Zeiss Ultra Plus Fesem marka cihaz ile tanımlamalar yapılmıştır [113].



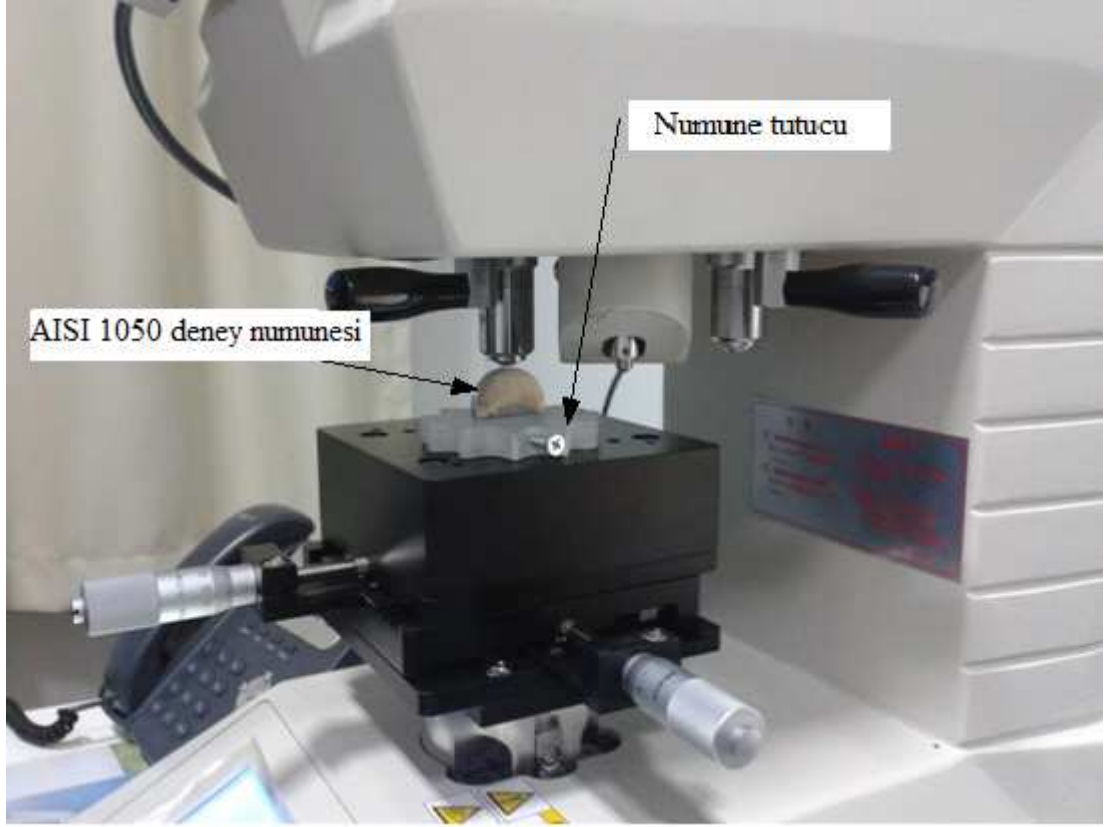
Şekil 4.20. Mikro görüntü ve element dağılımı analizinde kullanılan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı görüntüsü [113].

Çizelge 4.9. SEM görüntüsü alınan deney no ve özellikleri.

Sıra	Özelliği	Deney No
1	En çok talaş	109
2	En az talaş	56
3	En kötü yüzey	143
4	En iyi yüzey	22

4.11. MİKRO SERTLİK ANALİZLERİ

ASJ ile tornalamada işleme parametrelerinin iş parçasının mikro sertlik değerleri üzerindeki etkisini görebilmek için MH-130 Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı (Şekil 4.21) ile sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro sertlik cihazında tabanı kare piramit olan Vickers ucu ile 10 sn süre aralığında 200 gr yük uygulanarak ölçülmüştür.



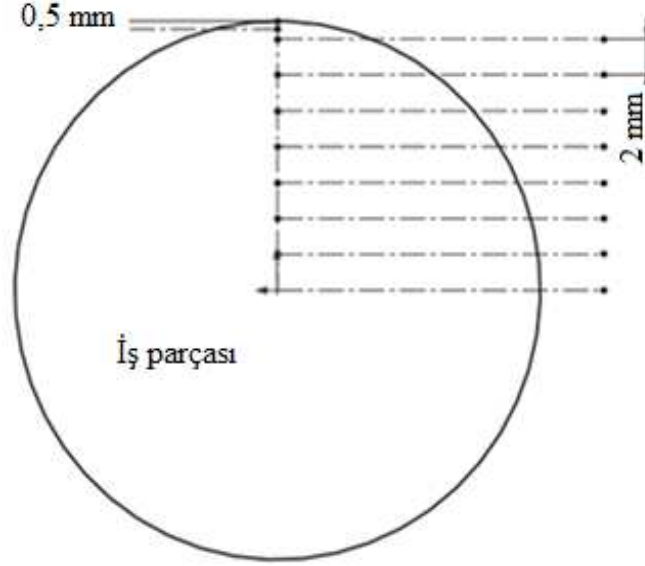
Şekil 4.21. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliğinden çıkartılan numunelerden mikro sertlik ölçüm anı görüntüsü [114].

Mikro sertlik ölçümü için ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliğinden çıkartılan numuneler Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği üzerinden alınan numuneler görüntüsü.

Mikro sertlik ölçümleri, yanal bölgeden 2 mm mesafe aralıklarla 8 ölçüm (Şekil 4.23) alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.23. ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği numuneleri üzerinden alınan mikro sertlik ölçüm bölgeleri gösterimi.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalara başlamadan önce aşındırıcı su jeti ile silindir iş parçalarının tornalanabilirliği (ASJT) araştırıldı. Literatür araştırmasında, ASJ ile silindir iş parçalarının tornalanabildiği tespit edildi. Fakat ASJ ile tornalamada torna deney düzeneklerinde torna aynasının muhafazasız kullanıldığı, düşük torna devir değerlerinde (maksimum 200 dev/dak) işlem yapıldığı ve işleme parametreleri olarak (nozul çapı, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi, torna devri) değerleri bir arada kullanılmadığı tespit edildi. Yapılan literatür çalışması sonucunda tespit edilen olumsuzluklar göz önünde bulundurularak bu çalışmada;

- Uygun torna deney düzeneği geliştirildi,
- Ön deneyler yapıldı,
- Parametreler nozul çapı hariç üç seviyeli (düşük, orta ve yüksek) seçildi,
- Tam faktöriyel deney düzeni kuruldu,
- Deneyler gerçekleştirildi,
- Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (μm) ölçüldü,
- Talaş kaldırma oranı (mm^3/dak), talaş hacmi (mm^3) ve kesme derinlikleri (mm) hesaplandı,
- Veriler Excel'e aktarıldı,
- Minitab 17.0 paket programına veri girişi ve tam faktöriyel istatistik analizler (Anova, veri uygunluk analizi, pareto analizi regresyon ve üç boyutlu grafik analizi) yapıldı,
- SEM görüntüleri alındı ve EDS ile element analizi gerçekleştirildi,
- Mikro sertlik ölçümü gerçekleştirildi.

5.2. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İSTATİSTİK ANALİZLER

Tam faktöriyel (Eşleşmeli), beş parametrelili deney düzenine göre yapılan ASJT işleminden sonra, iş parçası üzerinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm) ile talaş kaldırma oranı (mm^3/dak) değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir. Varyans analizi, tam faktöriyel analizler, üç boyutlu yüzey grafik analizleri ve regresyon analizleri için Çizelge 5.1’deki veriler kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Tam faktöriyel deney sırası ve deney sonuçları.

Deney no	Nozul Çapı, (NÇ) mm	Nozul İlerleme Miktarı (NİM) (mm/dak)	Aşındırıcı Akış Oranı, (AAO) g/dak	Nozul Yaklaşma Mesafesi, (NYM) mm	Torna Devri, (TD) dev/dak	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, (Ra) μm	Talaş Kaldırma Oranı, (TKO) mm^3/dak
1	0,7	5	50	2	500	2,00	37,67
2	0,7	5	50	2	1500	1,98	41,85
3	0,7	5	50	2	2500	1,73	43,43
4	0,7	5	50	10	500	2,33	45,33
5	0,7	5	50	10	1500	2,13	46,51
6	0,7	5	50	10	2500	1,65	44,29
7	0,7	5	50	18	500	2,59	41,78
8	0,7	5	50	18	1500	2,31	45,56
9	0,7	5	50	18	2500	2,15	45,94
10	0,7	5	200	2	500	1,71	47,90
11	0,7	5	200	2	1500	1,56	53,68
12	0,7	5	200	2	2500	1,29	56,46
13	0,7	5	200	10	500	1,95	52,76
14	0,7	5	200	10	1500	1,40	48,94
15	0,7	5	200	10	2500	1,36	50,72
16	0,7	5	200	18	500	2,48	53,81
17	0,7	5	200	18	1500	2,02	49,59
18	0,7	5	200	18	2500	1,64	53,57
19	0,7	5	350	2	500	1,56	55,93
20	0,7	5	350	2	1500	1,36	54,91
21	0,7	5	350	2	2500	1,00	61,69
22	0,7	5	350	10	500	1,98	60,99
23	0,7	5	350	10	1500	1,42	60,77
24	0,7	5	350	10	2500	1,23	59,95
25	0,7	5	350	18	500	1,99	62,04
26	0,7	5	350	18	1500	1,84	57,42
27	0,7	5	350	18	2500	1,68	64,60
28	0,7	25	50	2	500	3,07	21,89

Çizelge 5.1. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD	Ra	TKO
29	0,7	25	50	2	1500	2,85	27,87
30	0,7	25	50	2	2500	2,55	29,45
31	0,7	25	50	10	500	2,55	27,75
32	0,7	25	50	10	1500	2,30	25,33
33	0,7	25	50	10	2500	2,24	24,31
34	0,7	25	50	18	500	3,19	21,20
35	0,7	25	50	18	1500	3,13	28,18
36	0,7	25	50	18	2500	3,02	23,96
37	0,7	25	200	2	500	2,59	30,12
38	0,7	25	200	2	1500	2,30	35,30
39	0,7	25	200	2	2500	2,14	34,08
40	0,7	25	200	10	500	2,88	33,18
41	0,7	25	200	10	1500	2,63	36,36
42	0,7	25	200	10	2500	2,15	35,54
43	0,7	25	200	18	500	2,71	35,83
44	0,7	25	200	18	1500	2,64	34,21
45	0,7	25	200	18	2500	2,27	34,19
46	0,7	25	350	2	500	2,16	40,55
47	0,7	25	350	2	1500	1,86	36,73
48	0,7	25	350	2	2500	1,59	43,91
49	0,7	25	350	10	500	2,36	38,01
50	0,7	25	350	10	1500	2,20	39,39
51	0,7	25	350	10	2500	1,91	45,17
52	0,7	25	350	18	500	2,89	37,86
53	0,7	25	350	18	1500	2,40	40,84
54	0,7	25	350	18	2500	2,27	43,02
55	0,7	45	50	2	500	2,95	4,51
56	0,7	45	50	2	1500	2,81	10,09
57	0,7	45	50	2	2500	2,75	5,47
58	0,7	45	50	10	500	2,97	5,77
59	0,7	45	50	10	1500	2,87	7,95
60	0,7	45	50	10	2500	2,61	12,53
61	0,7	45	50	18	500	3,47	9,62
62	0,7	45	50	18	1500	3,27	5,00
63	0,7	45	50	18	2500	3,08	5,38
64	0,7	45	200	2	500	2,96	14,74
65	0,7	45	200	2	1500	2,77	12,12
66	0,7	45	200	2	2500	1,94	18,50
67	0,7	45	200	10	500	2,67	10,00
68	0,7	45	200	10	1500	2,38	16,58
69	0,7	45	200	10	2500	2,29	16,96

Çizelge 5.1. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD	Ra	TKO
70	0,7	45	200	18	500	3,13	11,65
71	0,7	45	200	18	1500	2,44	18,43
72	0,7	45	200	18	2500	2,11	13,41
73	0,7	45	350	2	500	2,23	17,57
74	0,7	45	350	2	1500	2,15	20,75
75	0,7	45	350	2	2500	1,88	20,53
76	0,7	45	350	10	500	2,50	23,03
77	0,7	45	350	10	1500	2,30	22,81
78	0,7	45	350	10	2500	2,00	24,99
79	0,7	45	350	18	500	2,65	20,68
80	0,7	45	350	18	1500	2,51	26,06
81	0,7	45	350	18	2500	2,33	23,04
82	1,3	5	50	2	500	2,26	40,07
83	1,3	5	50	2	1500	2,23	42,05
84	1,3	5	50	2	2500	1,95	49,83
85	1,3	5	50	10	500	2,63	41,53
86	1,3	5	50	10	1500	2,40	44,11
87	1,3	5	50	10	2500	1,86	49,69
88	1,3	5	50	18	500	2,92	45,98
89	1,3	5	50	18	1500	2,61	46,96
90	1,3	5	50	18	2500	2,42	43,54
91	1,3	5	200	2	500	1,93	50,50
92	1,3	5	200	2	1500	1,76	52,48
93	1,3	5	200	2	2500	1,45	51,26
94	1,3	5	200	10	500	2,20	47,16
95	1,3	5	200	10	1500	1,58	55,34
96	1,3	5	200	10	2500	1,53	56,52
97	1,3	5	200	18	500	2,80	48,81
98	1,3	5	200	18	1500	2,28	55,79
99	1,3	5	200	18	2500	1,85	56,77
100	1,3	5	350	2	500	1,76	55,33
101	1,3	5	350	2	1500	1,53	59,31
102	1,3	5	350	2	2500	1,13	59,89
103	1,3	5	350	10	500	2,23	55,99
104	1,3	5	350	10	1500	1,60	58,97
105	1,3	5	350	10	2500	1,38	58,55
106	1,3	5	350	18	500	2,24	60,44
107	1,3	5	350	18	1500	2,07	58,82
108	1,3	5	350	18	2500	1,89	64,80
109	1,3	25	50	2	500	3,46	20,69
110	1,3	25	50	2	1500	3,22	23,67

Çizelge 5.1. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD	Ra	TKO
111	1,3	25	50	2	2500	2,88	29,85
112	1,3	25	50	10	500	2,88	21,35
113	1,3	25	50	10	1500	2,59	29,33
114	1,3	25	50	10	2500	2,53	28,11
115	1,3	25	50	18	500	3,60	22,40
116	1,3	25	50	18	1500	3,53	27,78
117	1,3	25	50	18	2500	3,41	30,16
118	1,3	25	200	2	500	2,92	32,72
119	1,3	25	200	2	1500	2,59	37,50
120	1,3	25	200	2	2500	2,41	34,08
121	1,3	25	200	10	500	3,25	29,38
122	1,3	25	200	10	1500	2,97	32,96
123	1,3	25	200	10	2500	2,42	35,74
124	1,3	25	200	18	500	3,06	34,63
125	1,3	25	200	18	1500	2,98	36,21
126	1,3	25	200	18	2500	2,56	36,79
127	1,3	25	350	2	500	2,44	43,95
128	1,3	25	350	2	1500	2,10	40,73
129	1,3	25	350	2	2500	1,79	41,91
130	1,3	25	350	10	500	2,66	37,41
131	1,3	25	350	10	1500	2,48	38,79
132	1,3	25	350	10	2500	2,15	47,17
133	1,3	25	350	18	500	3,26	39,86
134	1,3	25	350	18	1500	2,71	41,04
135	1,3	25	350	18	2500	2,56	42,42
136	1,3	45	50	2	500	3,33	5,31
137	1,3	45	50	2	1500	3,17	10,09
138	1,3	45	50	2	2500	3,10	12,07
139	1,3	45	50	10	500	3,35	10,77
140	1,3	45	50	10	1500	3,24	5,15
141	1,3	45	50	10	2500	2,94	8,33
142	1,3	45	50	18	500	3,92	8,62
143	1,3	45	50	18	1500	3,69	7,40
144	1,3	45	50	18	2500	3,48	8,58
145	1,3	45	200	2	500	3,34	16,34
146	1,3	45	200	2	1500	3,13	19,32
147	1,3	45	200	2	2500	2,19	15,90
148	1,3	45	200	10	500	3,01	14,80
149	1,3	45	200	10	1500	2,68	15,58
150	1,3	45	200	10	2500	2,58	17,76

Çizelge 5.1. (devam ediyor).

Deney No	NÇ	NİM	AAO	NYM	TD	Ra	TKO
151	1,3	45	200	18	500	3,53	14,85
152	1,3	45	200	18	1500	2,75	16,43
153	1,3	45	200	18	2500	2,38	19,21
154	1,3	45	350	2	500	2,51	20,57
155	1,3	45	350	2	1500	2,42	20,15
156	1,3	45	350	2	2500	2,12	27,53
157	1,3	45	350	10	500	2,82	18,83
158	1,3	45	350	10	1500	2,59	21,21
159	1,3	45	350	10	2500	2,26	25,99
160	1,3	45	350	18	500	2,99	24,08
161	1,3	45	350	18	1500	2,83	23,06
162	1,3	45	350	18	2500	2,63	28,84

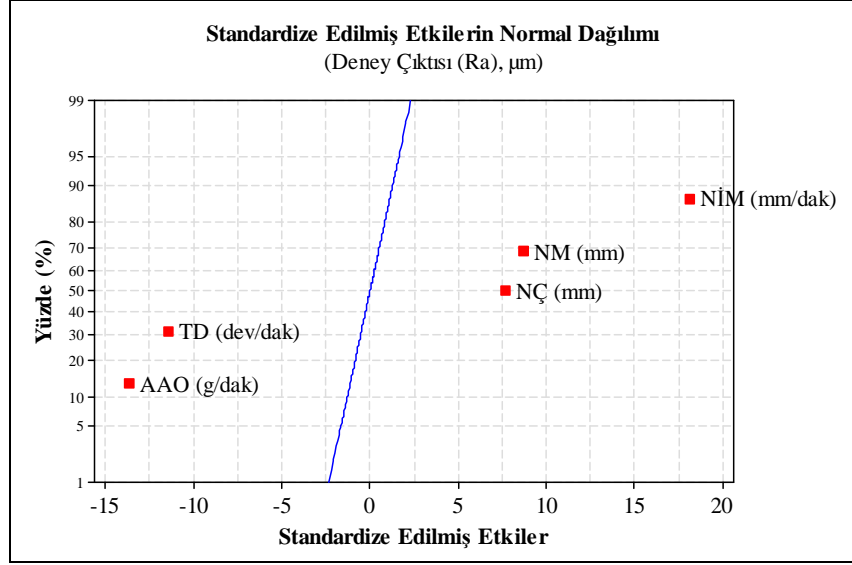
5.3. TAM FAKTÖRİYEL TASARIM İSTATİSTİK ANALİZLERİ

AISI 1050 çeliğinin ASJT ile işlenmesinde işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkilerini araştırmak için tam faktöriyel tasarım analizi (Full Factorial Design and analysis) tercih edilmiştir.

Deneyle sonuçunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı (Çizelge 5.1) deney sonuçları Minitab programına girilerek ($2^1 \times 3^4$) tam faktöriyel analiz gerçekleştirilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı için gerçekleştirilen tam faktöriyel analiz kapsamında varyans analizi, veri uygunluk analizi, regresyon analizi, pareto analiz ve üç boyutlu yüzey grafik analizleri yapılmıştır. Tüm analizlerde Çizelge 5.1'de tanımlanan parametre sembolleri kullanılmıştır.

5.4. ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İÇİN YAPILAN TAM FAKTÖRİYEL ANALİZ

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan tam faktöriyel analiz sonucunda elde edilen normal olasılık grafiği Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için standardize edilmiş etkilerin normal dağılımı.

Şekil 5.1’de istatistiki olarak önemli parametreler kare (■) ile sembolize edilmiştir. Parametreler doğrusal çizgi üzerinde bulunmayıp sapma gösterdikleri için ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde değişkenlerin etki değerlerini belirlemek amacıyla % 95 güven aralığında varyans analizi yapılmıştır. Seçilen beş bağımsız ASJT işleme parametrelerinin (nozul çapı, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi ve torna devri) bağımlı değişken olan ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi analiz edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizi sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

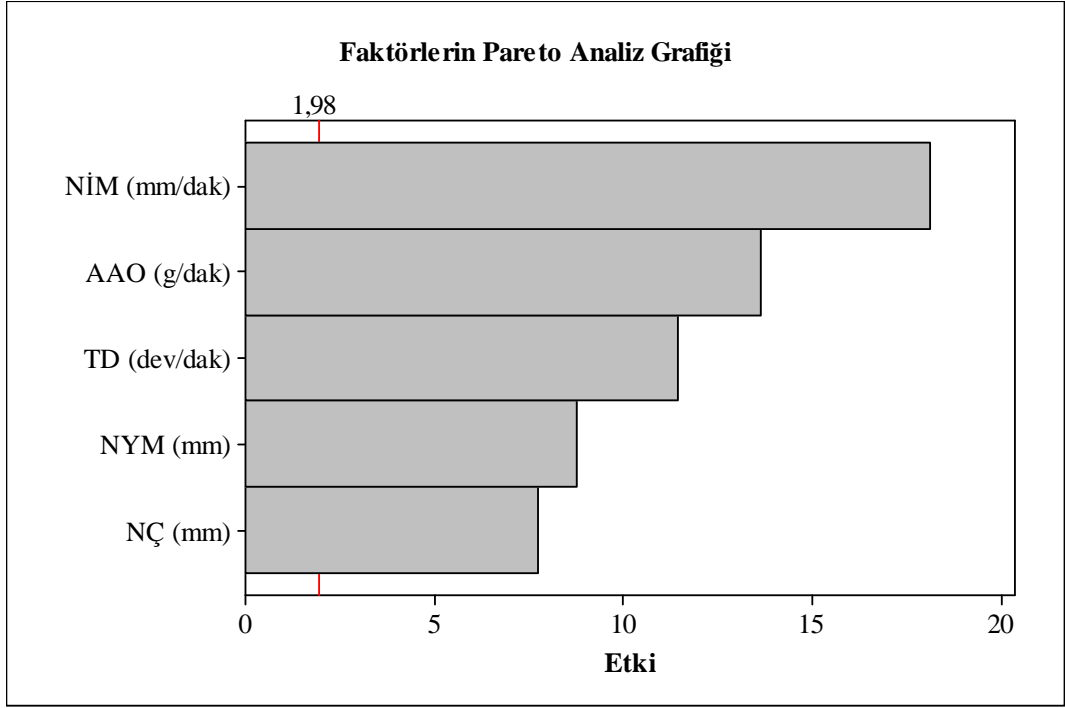
Çizelge 5.2. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analiz sonuç tablo.

Paramtreler	SD	KT	KO	F	Etki (%)
NÇ (mm)	1	3,578	3,578	107,141	6,35
NİM (mm/dak)	2	23,039	11,520	344,910	40,93
AAO (g/dak)	2	11,383	5,691	170,404	20,22
NYM (mm)	2	5,378	2,689	80,509	9,55
TD (dev/dak)	2	7,839	3,919	117,359	13,92
Hata	152	5,072	0,033	-----	9,01
Toplam	161	56,291			100,00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması, F: F oranı

Çizelge 5.2’de ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde tüm kontrol parametrelerin ve etkileşimlerinin % 1’den fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde % 10’dan daha büyük etkiye sahip ana etkiler sıralandığında % 40 ile nozul ilerleme miktarı, % 20 aşındırıcı akış oranı ve % 14 ile torna devri olmuştur.

Pareto diyagramı, bir problemin önemli sebeplerini daha az öneme sahip olan sebeplerden ayırt etmekte kullanılan bir çubuk diyagramıdır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde parametrelerin etki sıralamalarını gösteren pareto grafiği Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Ana parametrelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin pareto analiz grafiği.

Pareto analiz grafiği üzerinde 0,05 anlamlılık düzeyinde eşik değeri 1,98’dir. Şekil 5.2’de eşik çizgisini geçen parametreler ortalama yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen parametrelerdir. Şekil 5.2’de verilen pareto grafiğinde eşik değerini tüm parametreler geçmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü miktarını en çok etkileyen parametre nozul ilerleme miktarı olmuştur.

5.4.1. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Yapılan Regresyon Analizi

Analizlerle oluşturulan modelin uygunluğunu gösteren R^2 , bağımsız parametrelerden türetilen bağımlı parametredeki değişim oranıdır. Anova analizi ile hesaplanan R^2 değerinin 1'e yakın olması bağımlı parametrelerle, bağımsız parametreler arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ifade etmektedir. Yapılan bu analize göre, ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri için tahmin formülü elde edilmiştir. Tahminsel ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini veren doğrusal regresyon denklem modeli denklem 5.1'de verilmiştir. Elde edilen denklemin standart sapması, $S=0,1826$, $R^2=0,90$ olarak elde edilmiştir.

$$\text{Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü} = 1,9799 + 0,4954 \text{ Nozul Çapı} + 0,0213 \text{ Nozul İlerleme Miktarı} - 0,0021 \text{ Aşındırıcı Akış Oranı} + 0,0258 \text{ Nozul Yaklaşma Mesafesi} - 0,0002 \text{ Torna Devri} \quad (5.1)$$

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen doğrusal regresyon denklem modeline ait katsayılar Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için doğrusal regresyon denklem katsayıları.

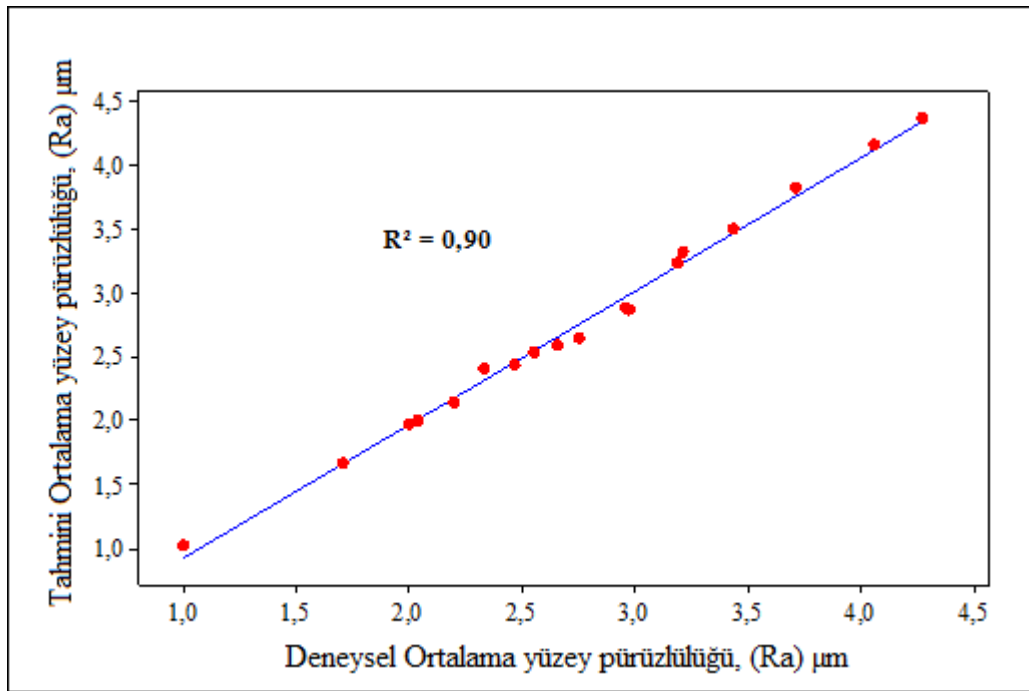
Tahmin Unsuru	Katsayılar	Standart Sapma Katsayıları	T	P
Sabit	1,9799	0,0919	21,52	<0,001
NÇ (mm)	0,4954	0,0641	7,72	<0,001
NİM (mm/dak)	0,0213	0,0011	18,14	<0,001
AAO (g/dak)	-0,0021	0,0001	-13,64	<0,001
NYM (mm)	0,0258	0,0029	8,76	<0,001
TD (dev/dak)	-0,0002	0,0002	-11,43	<0,001

T: Test istatistiklerinin sonucu, P: Regresyon analizinin anlamlılık seviyesi

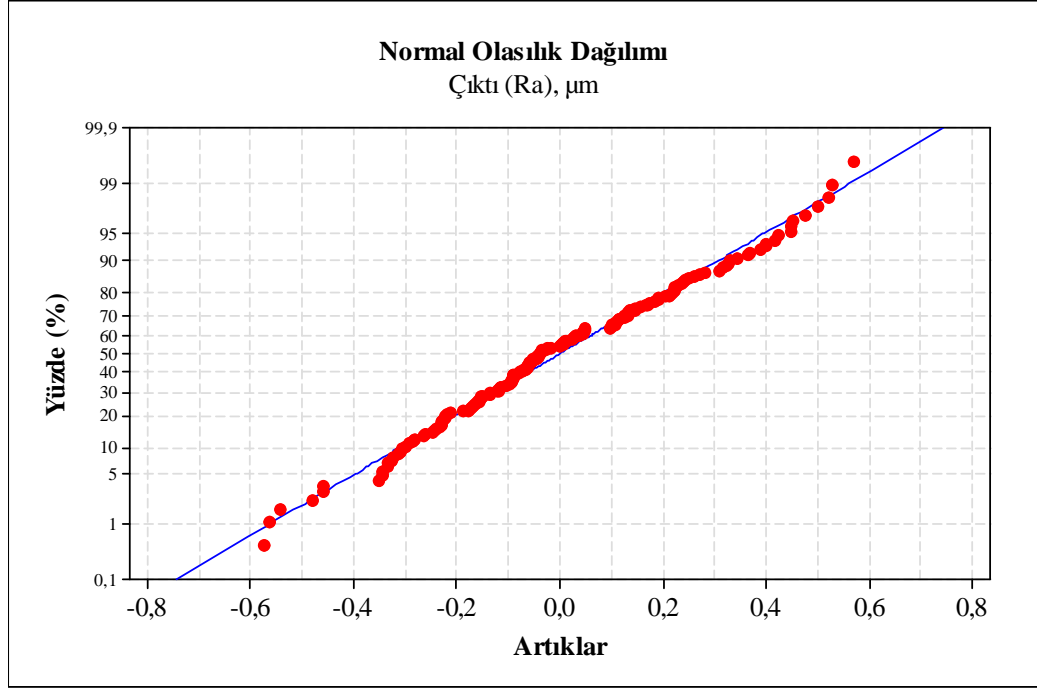
Doğrusal regresyon denklem modeli % 95 güven aralığında yapılmıştır. Bu denklem, işleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki anlamlı etkilerini % 90 seviyesinde açıklayabilmektedir.

5.4.2. Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü İçin Geliştirilen Doğrusal Regresyon Denklemi Modelinin Uygunluk Kontrolü

Geliştirilen matematik model deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve matematik modelin tahminlerinin yeteri kadar güvenliği tespit edilmiştir. Geliştirilen matematik model ile deney sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 5.3'te verilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü doğrusal regresyon denkleminin hatalarının normal olasılık eğrisi ise Şekil 5.4'te verilmiştir.



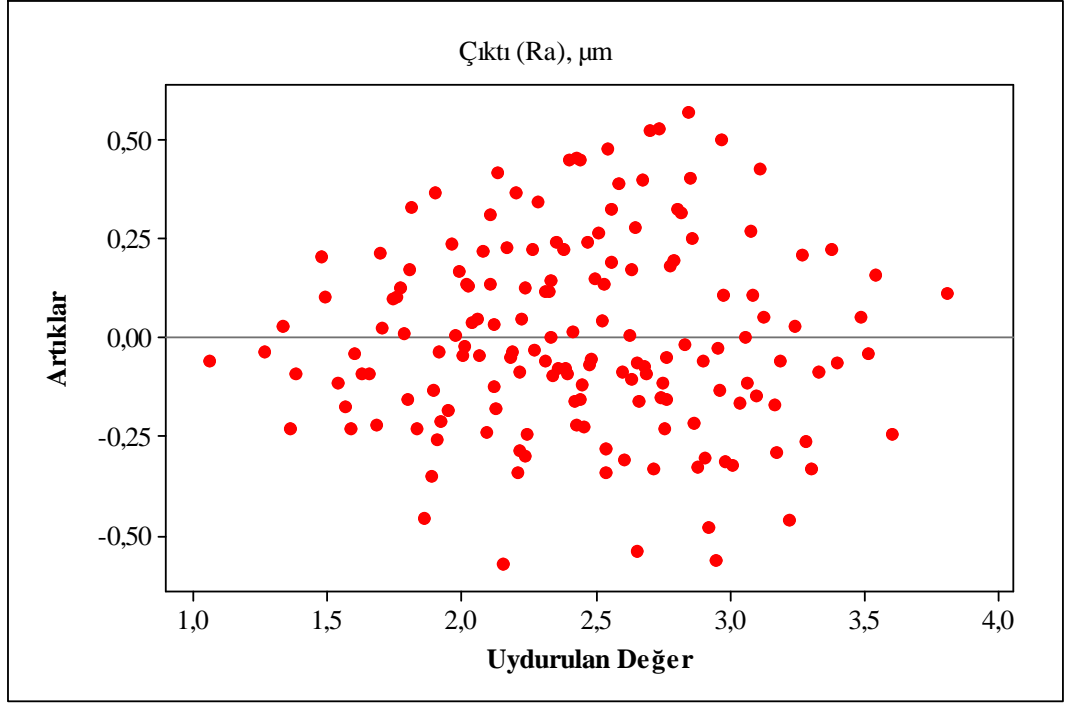
Şekil 5.3. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için geliştirilen matematik modelin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması.



Şekil 5.4. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için doğrusal regresyon denklemi hatalarının normal olasılık eğrisi.

Deneysel ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri ile tahminsel değerlerin karşılaştırılması yapılmış ve artıklar bulunarak her deneydeki % hata oranları verilmiştir. Normal olasılık grafiğinde (Şekil 5.4) tüm noktaların düz bir çizgi boyunca olduğu tespit edilmiştir. Tüm noktaların düz bir çizgi boyunca olması ile elde edilen sonuçlar için normallik varsayımının doğruluğunu kanıtlamaktadır. Şekil 5.4'teki grafik seçilen modelin geçerliliği için gerekli şartların tatmin edici olduğunu ve deneyin doğruluğunu göstermektedir.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için uydurulan değerlerin artıklara karşı grafiği Şekil 5.5'te verilmiştir.



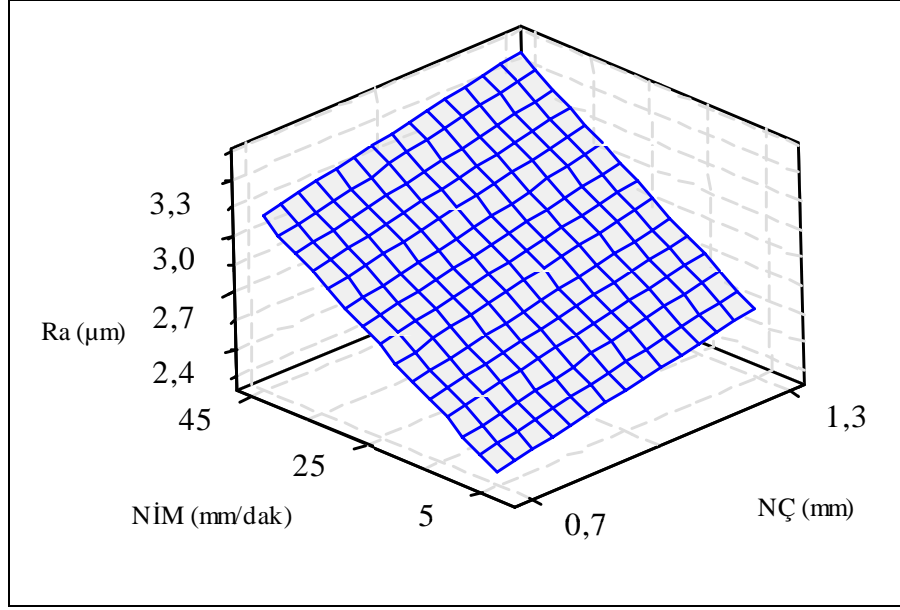
Şekil 5.5. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için uydurulan değerlerin artıklara etkisini gösteren grafik görünümü.

Elde edilen grafikte (Şekil 5.5) tüm noktalar, artık değerlerin sıfır olduğu yatay çizginin altında ve üstünde dengeli dağılım göstermekte ve bu durum modelin uygunluğunu göstermektedir. Tüm noktalar -0,55 ile +0,55 değerleri arasında olmuştur. Sonuç olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü için oluşturulan doğrusal regresyon denklem modelinin uygun olduğu görülmüştür.

5.4.3. İşleme Parametrelerinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisini Gösteren Yüzey Grafik Analizleri

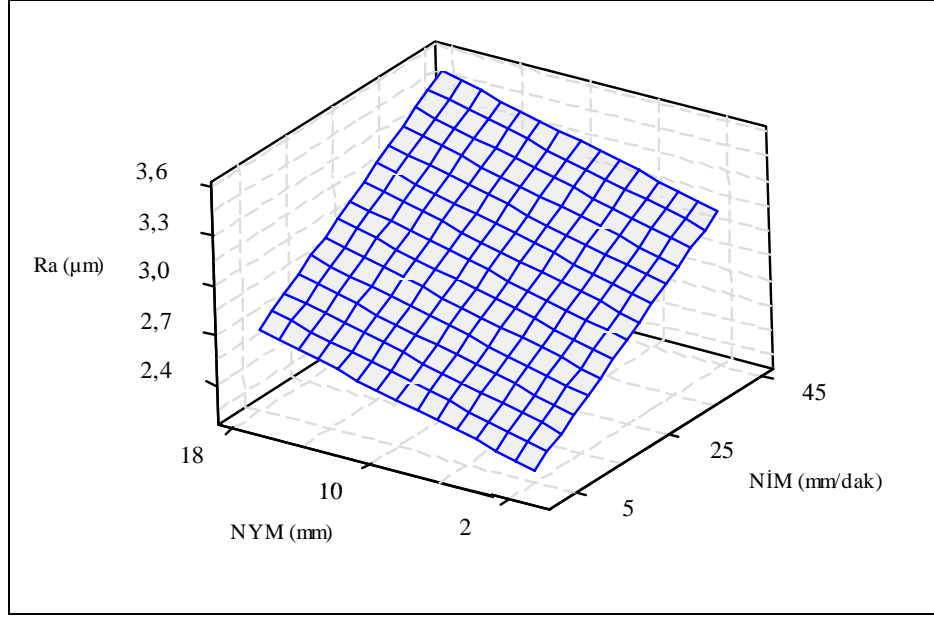
İşleme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini analiz etmek için üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiş ve elde edilen grafikler yorumlanmıştır.

Nozul ilerleme miktarı ve nozul çapının üç boyutlu düzlemsel yüzey grafiği Şekil 5.6'da, nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafiği Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.6. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (AAO 50 g/dak, NYM 2 mm, TD 500 dev/dak).

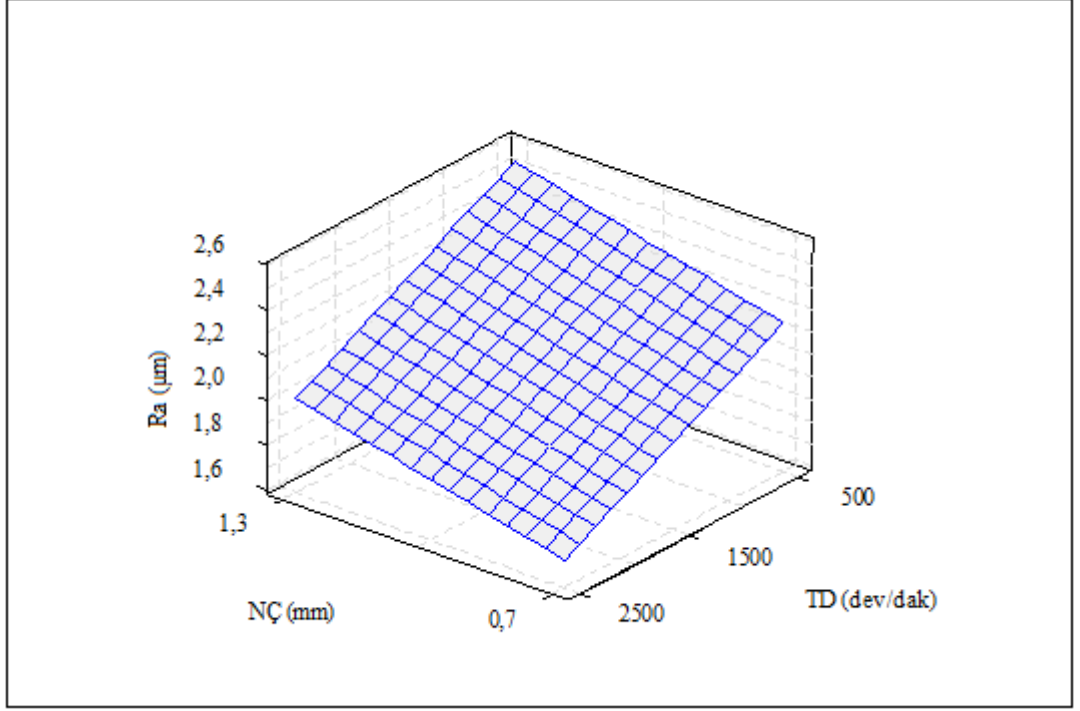
Şekil 5.6'da, nozul ilerleme miktarı 5 mm/dak'dan 45 mm/dak'ya artırılınca ortalama yüzey pürüzlülük değeri % 53 artmıştır. Nozul çapı değeri 0,7 mm'den 1,3 mm değerine artırıldığında da ortalama yüzey pürüzlülük değeri % 14 artmıştır. Nozul ilerleme miktarı seviyesindeki artışın ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi nozul çapı artışındaki etkiden % 40 daha çok olmuştur.



Şekil 5.7. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (AAO 50 g/dak, NÇ 0,7 mm, TD 500 dev/dak).

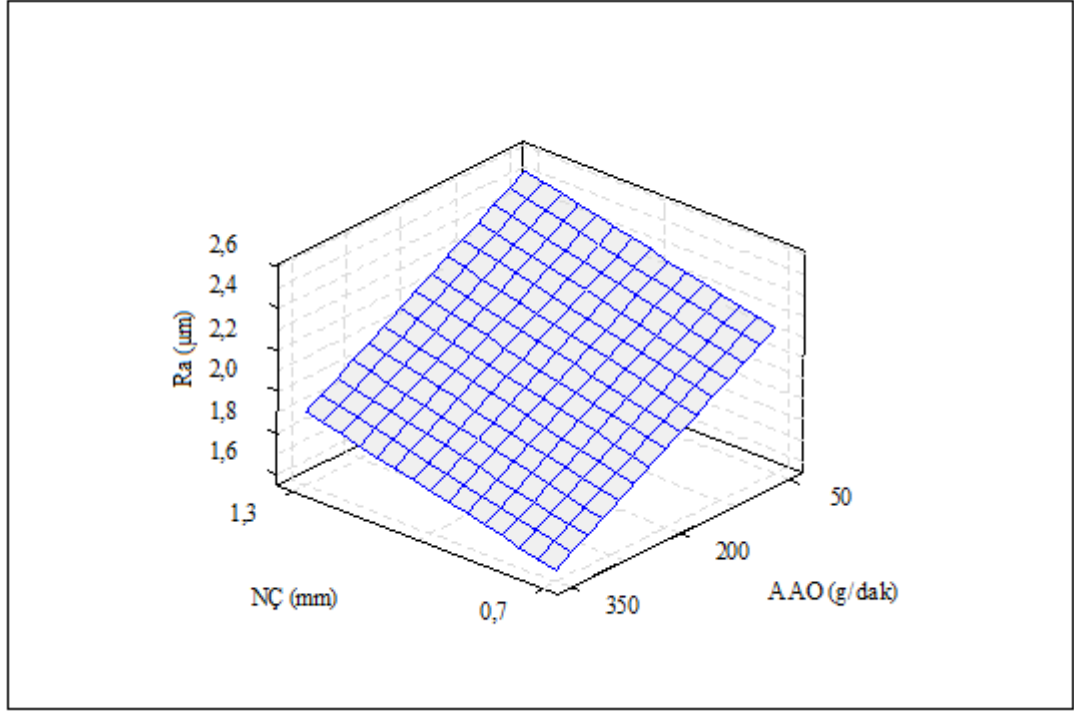
Şekil 5.7’de nozul ilerleme miktarı ve nozul yaklaşma mesafesi her iki parametre seviyesinin artışı ortalama yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı tespit edilmiştir. Nozul ilerleme miktarındaki artışın ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine etkisi nozul yaklaşma mesafesinden % 24 daha fazla olmuştur.

Nozul çapı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği görüntüsü Şekil 5.8’de, Nozul çapı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği ise Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.8. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul çapı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, AAO 500 dev/dak).

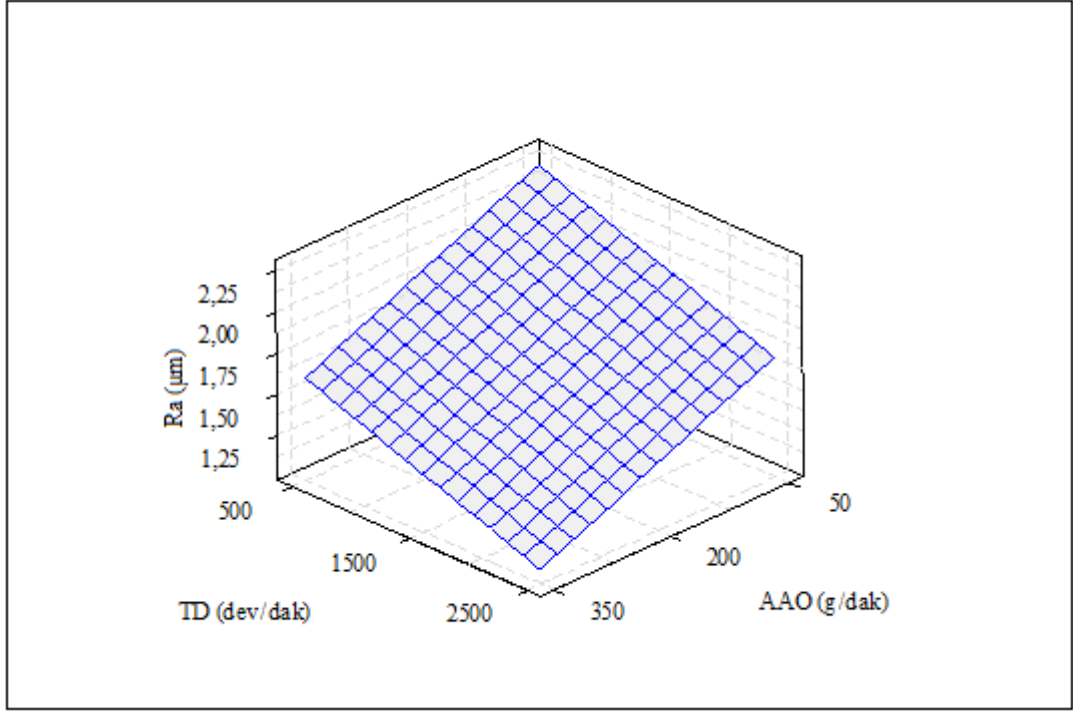
Şekil 5.8’de, nozul çapı değerinin 0,7 mm den 1,3 mm ye artırılması ortalama yüzey pürüzlülük değerini % 14 arttırdığı, torna devrinin 500 mm/dak değerinden 2500 dev/dak değerine artırılması ortalama yüzey pürüzlülük değerini % 14 azalttığı tespit edilmiştir. Nozul çapı 0,7 mm ve torna devri 2500 dev/dak olduğunda ortalama yüzey pürüzlülük değeri en düşük seviyede (1,73 µm) olmuştur. Nozul çapı 1,3 mm, torna devri değeri ise 500 dev/dak değerinde ortalama yüzey pürüzlülük değeri en yüksek seviyede (2,26 µm) olmuştur.



Şekil 5.9. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul çapı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, TD 500 dev/dak).

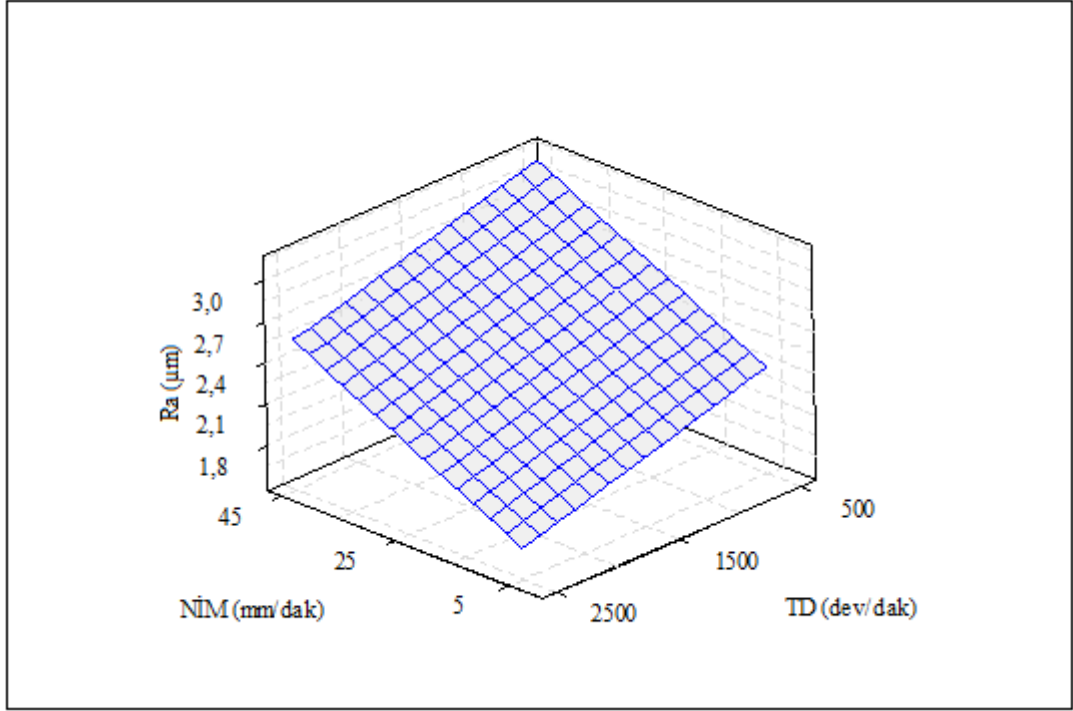
Şekil 5.9’da, nozul çapı değeri 0,7 mm den 1,3 mm değerine arttırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde % 14 artış tespit edilmiştir. Aşındırıcı akış oranı 350 g/dak’dan 50 g/dak’ya azaltıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde % 22 artış tespit edilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri (2 µm) 0,7 mm nozul çapı ve 350 g/dak aşındırıcı akış oranı değerinde elde edilmiştir. En yüksek ortalama pürüzlülük değeri (2,26 µm) ise 1,3 mm nozul çapı ve 50 g/dak aşındırıcı akış oranı değerinde elde edilmiştir.

Aşındırıcı akış oranı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü Şekil 5.10’da, nozul ilerleme miktarı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü ise Şekil 5.11’de verilmiştir.



Şekil 5.10. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm).

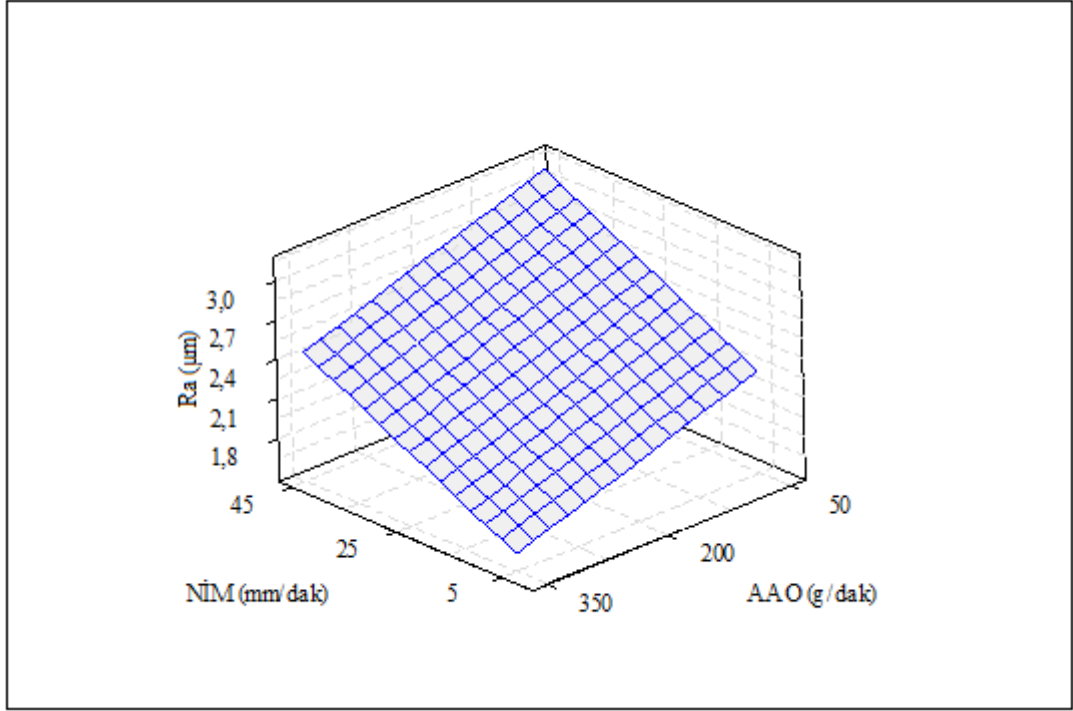
Şekil 5.10'daki grafikte 350 g/dak aşındırıcı akış oranı değerinde torna devri değeri 500 dev/dak değerinden 2500 dev/dak değerine artırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde iyileşme görülmüştür. Torna devri 2500 dev/dak değerinde iken aşındırıcı akış oranı 350 g/dak değerinden 50 g/dak değerine azaltıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değeri % 73 artış göstermiştir.



Şekil 5.11. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve torna devri parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm).

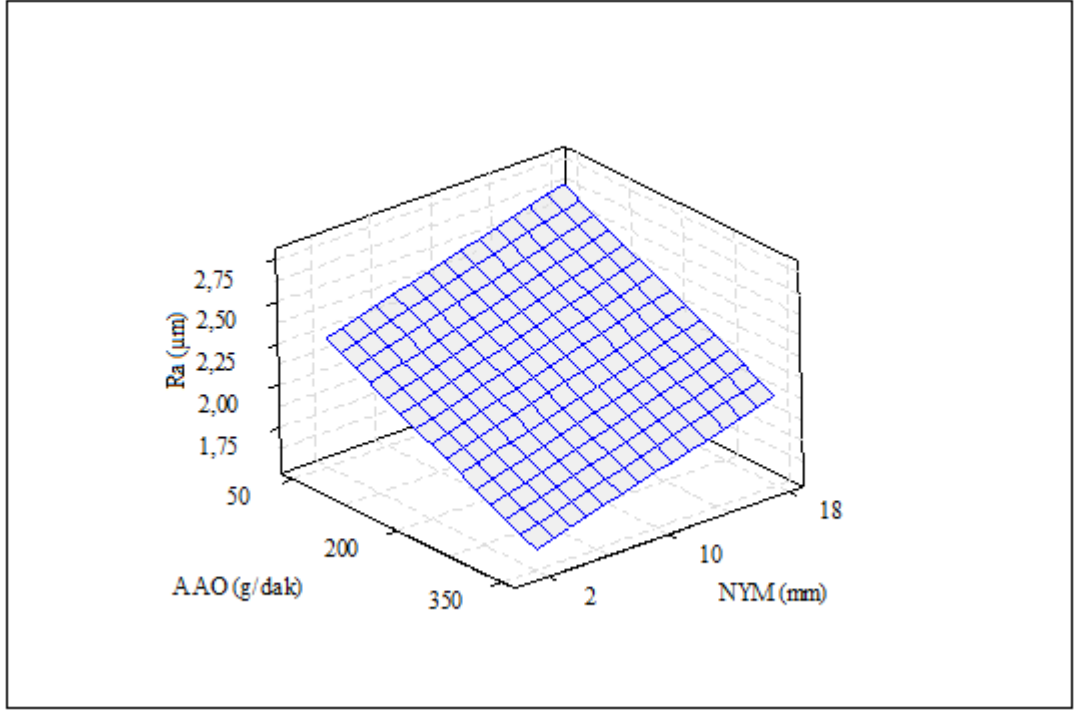
Şekil 5.11’de, nozul ilerleme miktarı değeri arttığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde artış, torna devri değeri arttırıldığında düşüş göstermiştir. Nozul ilerleme miktarı ile torna devri ters orantılı bir etki ile ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilemiştir.

Nozul ilerleme miktarı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği Şekil 5.12’de, aşındırıcı akış oranı ve nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.12. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve aşındırıcı akış oranı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (TD 500 dev/dak, NYM 2 mm, NÇ 0,7 mm).

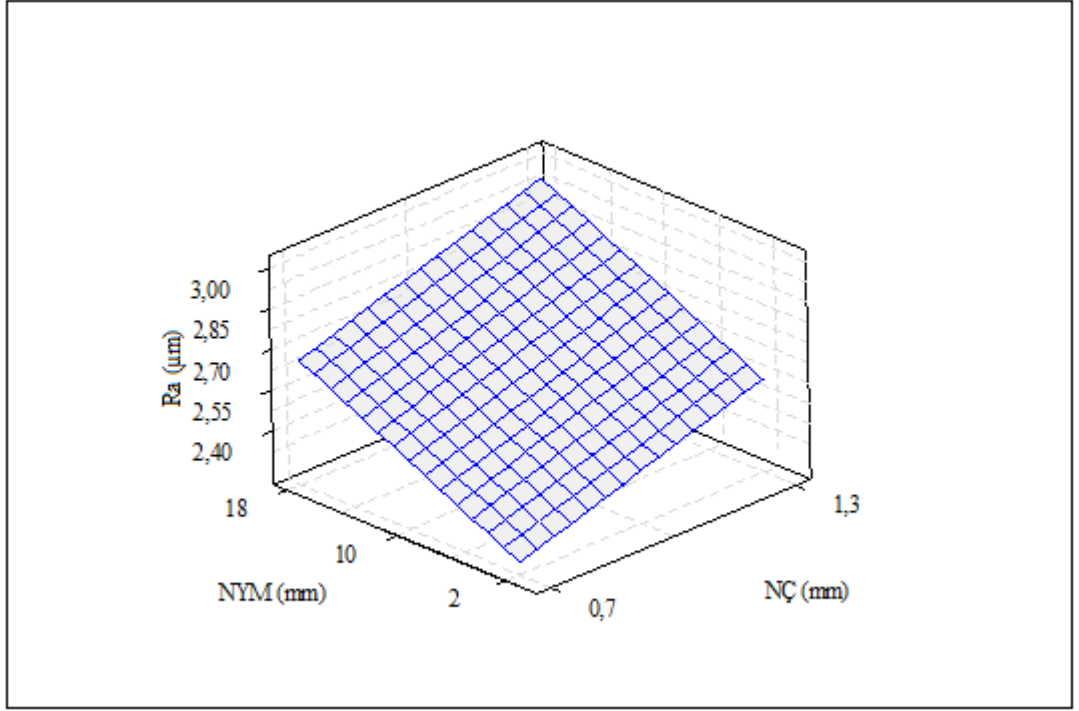
Şekil 5.12’de nozul ilerleme miktarının 5 mm/dak’dan 45 mm/dak değerine arttırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değeri % 53 artış göstermiştir. Aşındırıcı akış oranının artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değeri düşüş göstermiştir. Nozul ilerleme miktarı ile aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi ters orantılı olmuştur.



Şekil 5.13. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ve nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 500 dev/dak, NÇ 0,7 mm).

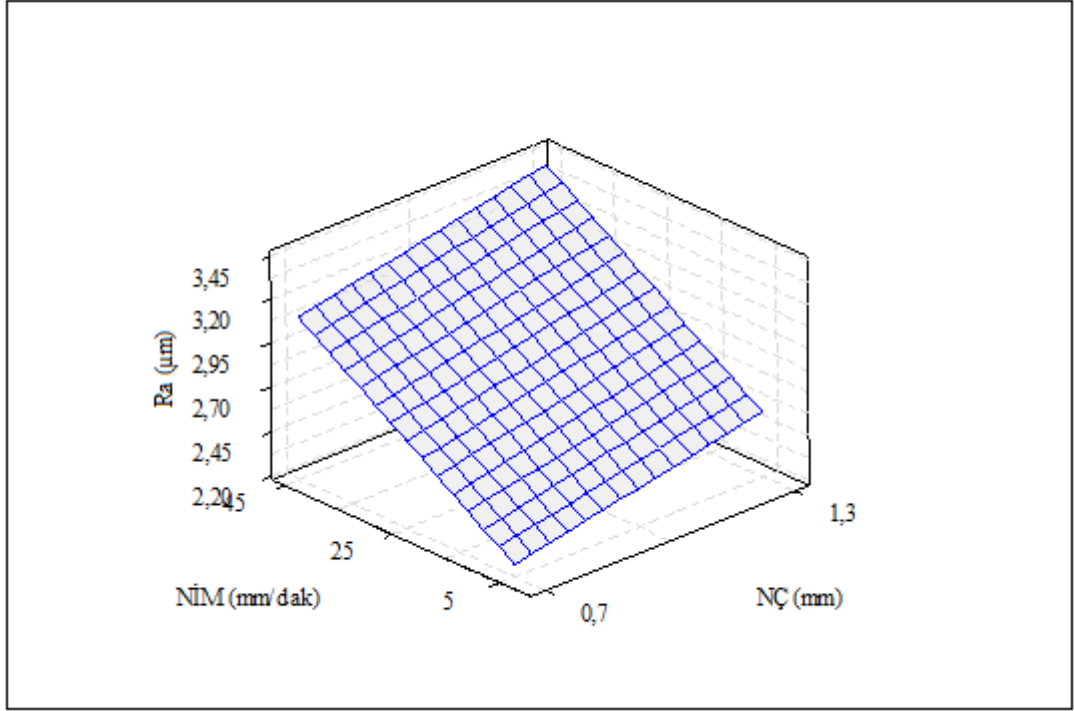
Şekil 5.13'te, aşındırıcı akış oranının artırılması ortalama yüzey pürüzlülük değerini iyileştirmiştir. Nozul yaklaşma mesafesinin artması ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artmasına neden olmuştur. Aşındırıcı akış oranı 50 g/dak'dan 350 g/dak'ya arttırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde % 22'lik düşüş tespit edilmiştir. Aşındırıcı akış oranı ile nozul yaklaşma mesafesi ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde ters orantılı etki göstermiştir.

Nozul yaklaşma mesafesi ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği Şekil 5.14'te, nozul ilerleme miktarı ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren yüzey grafiği Şekil 5.15'de verilmiştir.



Şekil 5.14. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul yaklaşma mesafesi ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak).

Şekil 5.14'deki grafikte nozul yaklaşma mesafesi ve nozul çapı parametre değerleri arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Nozul yaklaşma mesafesinin en düşük parametre seviyesi 2 mm'den 18 mm'ye arttırılmasında etki nozul çapının 0,7 mm'den 1,3 mm seviyesine arttırılmasında ki etkiden % 16 daha fazla olmuştur.



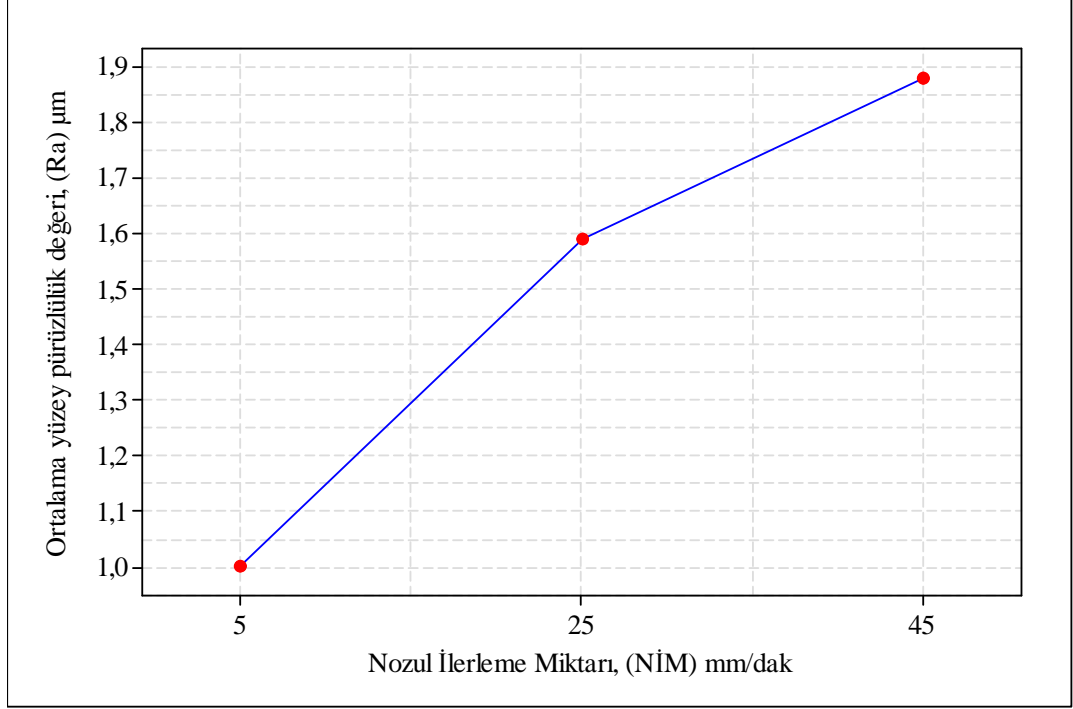
Şekil 5.15. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ve nozul çapı parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak).

Şekil 5.15’de, nozul ilerleme miktarı 5 mm/dak’dan 45 mm/dak seviyesine artırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Nozul çapı değeri 0,7 mm’den 1,3 mm seviyesine artırıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değeri artış göstermiştir.

5.5. İŞLEME PARAMETRELERİNİN ORTALAMA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

5.5.1. Nozul İlerleme Miktarının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

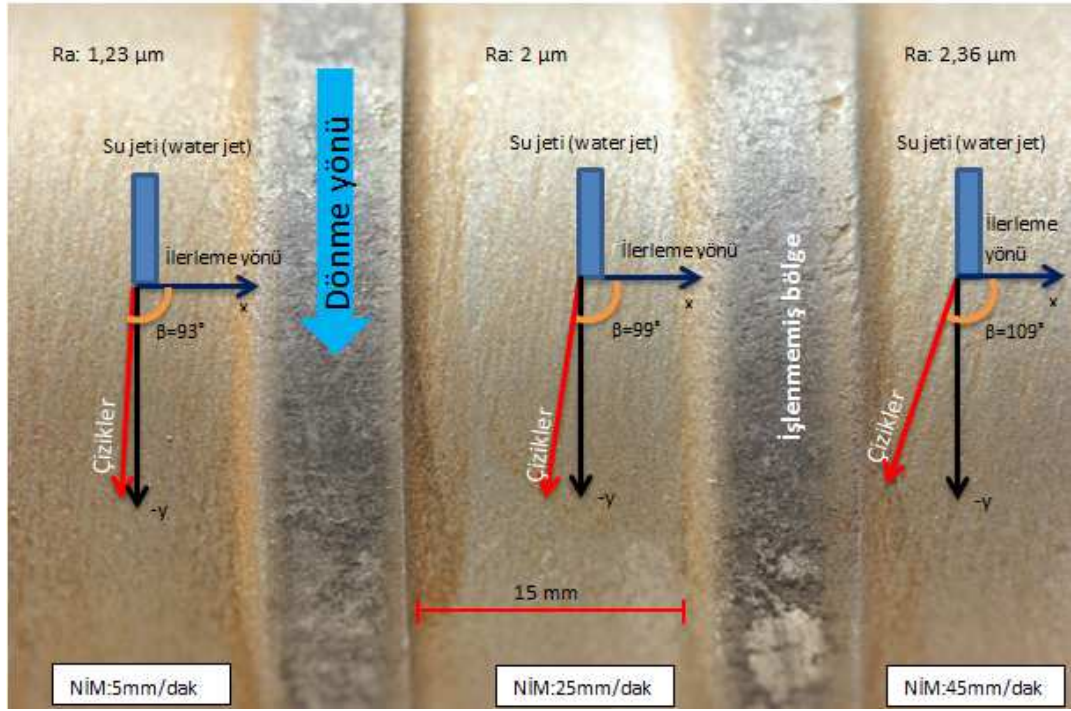
Nozul ilerleme miktarı değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak, NÇ 0,7 mm).

Nozul ilerleme miktarının artışı, ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artışına neden olmuştur. Nozul ilerleme miktarı 5 mm/dak değerinden 45 mm/dak değerine arttırıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri % 45 artış göstermiştir.

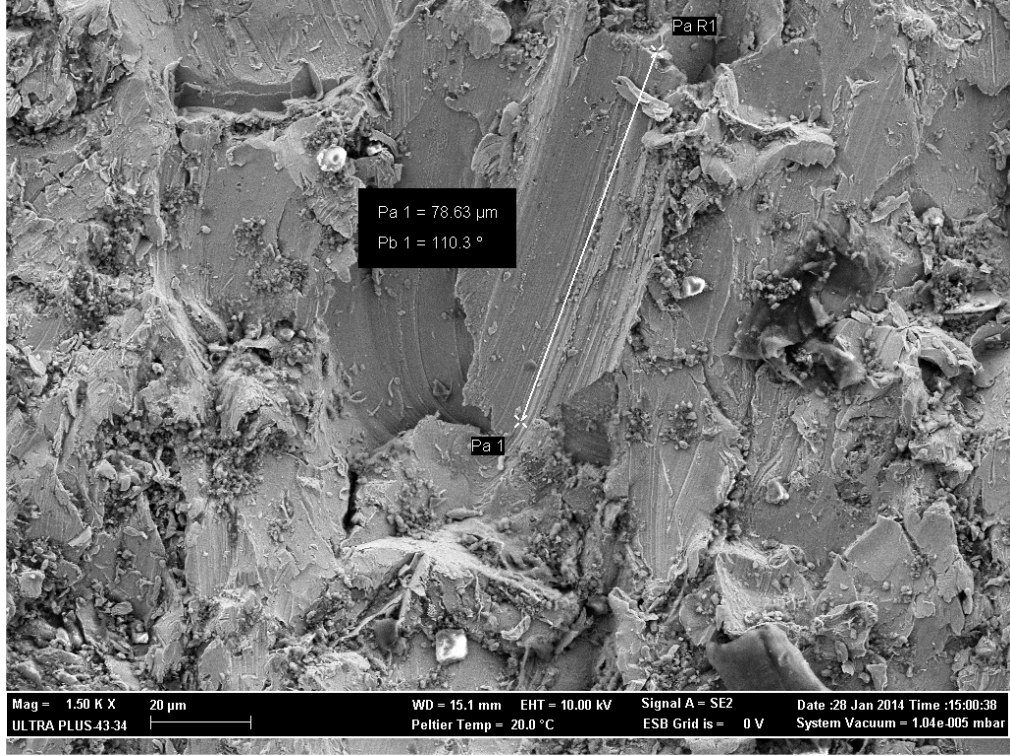
ASJT ile işleme esnasında iş parçası dairesel hareket yaparken aşındırıcı jet ise doğrusal hareket yapmaktadır. Dairesel ve doğrusal harekete bağlı olarak iş parçası üzerinde spiral şeklinde izler oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 5.17). Nozul ilerleme miktarı arttıkça iş parçası üzerinde oluşan spiral izler artış göstermiştir. Spiral şeklindeki izlerin artışı ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artışına neden olmuştur. Şekil 5.17’de, üç farklı nozul ilerleme değerinde oluşan farklı yüzey çizik izlerinin X eksenini ile yaptığı açılar gösterilmiştir. Elde edilen bulgular literatür ile örtüşmektedir [81-96].



Şekil 5.17. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile farklı nozul ilerleme değerlerinde işlenmesi sonucu iş parçası yüzeyinde oluşan çizik açılarının görüntüsü (NYM 2 mm, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak, NÇ 0,7 mm).

ASJT işleminde denenen şartlar içinde en yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesinde etkili olan parametreler sırasıyla; nozul çapı 1,3 mm, nozul ilerleme miktarı 45 dev/dak, aşındırıcı akış oranı 50 g/dak, nozul yaklaşma mesafesi 18 mm, ve torna devri 500 dev/dak dir. 45 mm/dak nozul ilerleme değeri kullanılarak yapılan tornalama işlemi sonrasında iş parçasın üzerinden alınan mikro görüntüde X eksenini ile 109°'lik açı oluşturan çizikler tespit edilmiştir (Şekil 5.17). Nozul ilerleme değerinin 5 mm/dak kullanılması sonrası oluşan çizik X eksenini ile yaptığı açı 93° olduğu tespit edilmiştir. En düşük ve en yüksek ilerleme değerlerinin kullanılması sonrası oluşan çizikler arasında 16°'lik fark tespit edilmiştir.

AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde kullanılan 120 mesh garnet tipi aşındırıcının iş parçası yüzeyinde yapmış olduğu mikro iz 1500x büyütme görüntüsü Şekil 5.18'de verilmiştir.

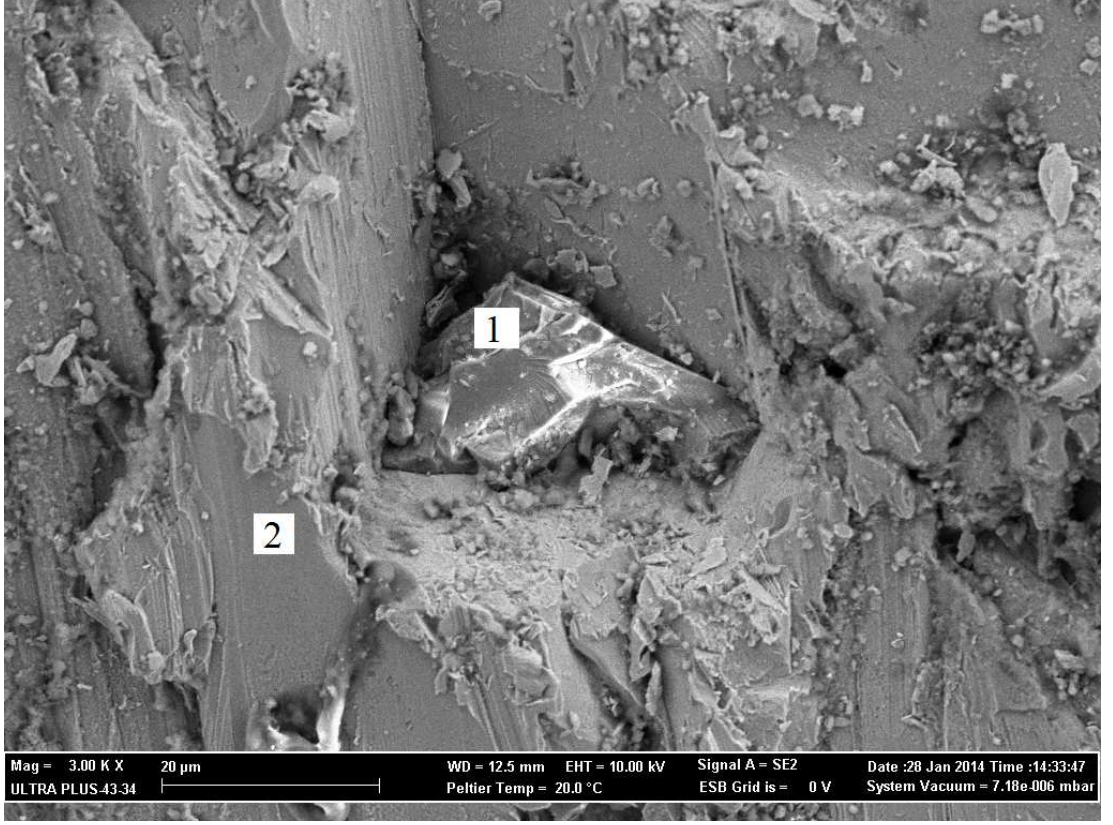


Şekil 5.18. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde kullanılan aşındırıcı parçacığın (120 mesh garnet) yapmış olduğu mikro iz 1500x büyütmeli görüntüsü (NYM 18 mm, TD 500 dev/dak, AAO 50 g/dak, NÇ 1,3 mm NİM 45 mm/dak).

Şekil 5.18’de gösterilen SEM görüntüsünde yer alan aşındırıcı çizik Şekil 5.17’de gösterilen 45 mm/dak ilerlemede elde edilen çizik X eksenine ile yaptığı açı (110°) benzerlik göstermiştir.

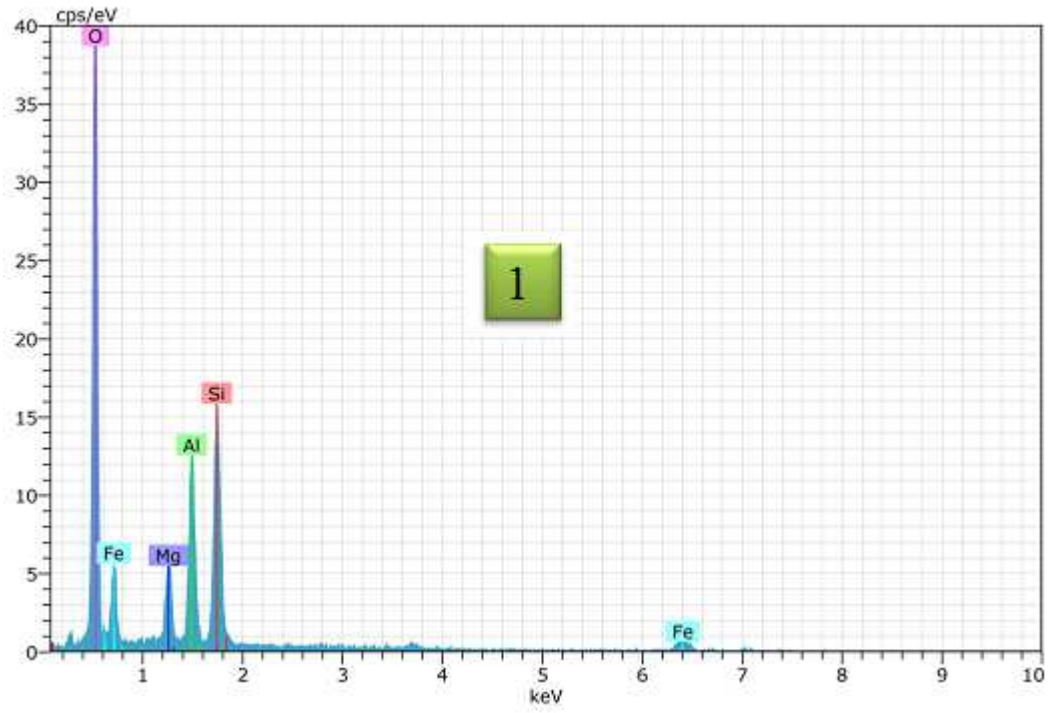
5.5.2. EDS Analizi İle Element Tanımlama

İş parçasına bağlı olarak ASJT yönteminin genel işleme yapısı gereği yüksek basınç ve kinetik enerjili aşındırıcının iş parçası yüzeyine saplanması kaçınılmazdır [114-125]. İş parçası yüzeyine sapan aşındırıcıların tespiti için iş parçası yüzeyinin SEM görüntüsü (Şekil 5.19) alınmıştır. Şekil 5.19’da verilen 3000x büyütmeli SEM görüntüsünde nesnenin element tanımlaması EDS (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy) analizi ile yapılmıştır. Şekil 5.19’de 1 nolu nesne aşındırıcı, 2 nolu nesne ise deney numunesi AISI 1050 çeliğidir.

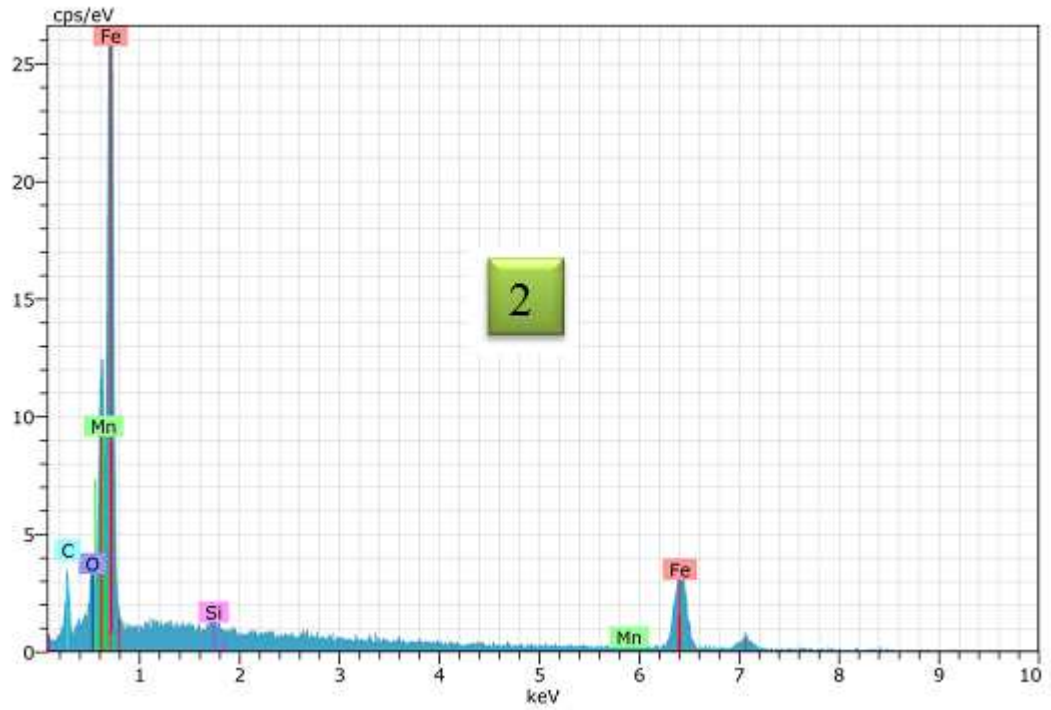


Şekil 5.19. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde 1 ve 2 nolu nesnelerin EDS analizi için 3000x büyütme SEM görüntüsü (NYM 18 mm, TD 500 dev/dak, AAO 50 g/dak, NÇ 1,3 mm NİM 45 mm/dak).

Yapılan EDS spektrum analizi sonucunda 1 numara ile gösterilen nesneye ait element dağılımı Şekilde 5.20’de 2 numaralı nesneye ait element dağılımı ise Şekil 5.21’de gösterilmiştir.

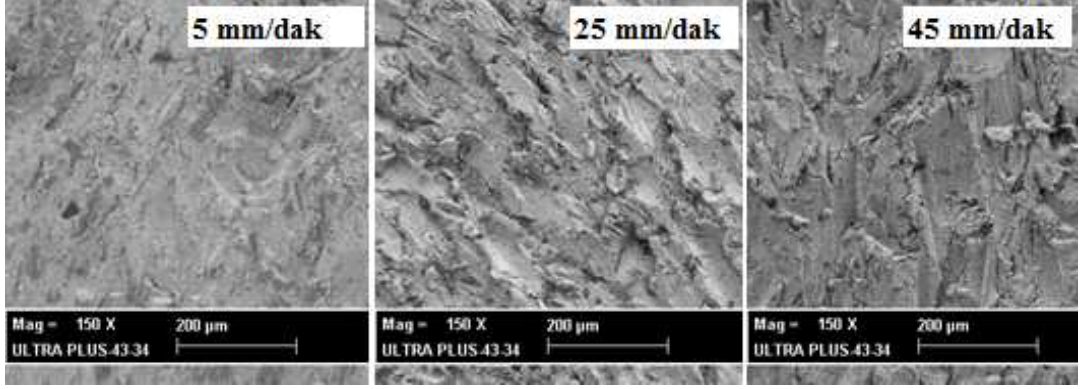


Şekil 5.20. 1 nolu aşındırıcı numune üzerinde yapılan EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.



Şekil 5.21. 2 nolu AISI 1050 çeliğine ait EDS analizi ve elementlerin (%) dağılımı görüntüsü.

AISI 1050 çeliğinin ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarlarının 5, 25 ve 45 mm/dak değerlerinde işlenen numunelerden alınan SEM görüntüleri Şekil 5.22’de verilmiştir.

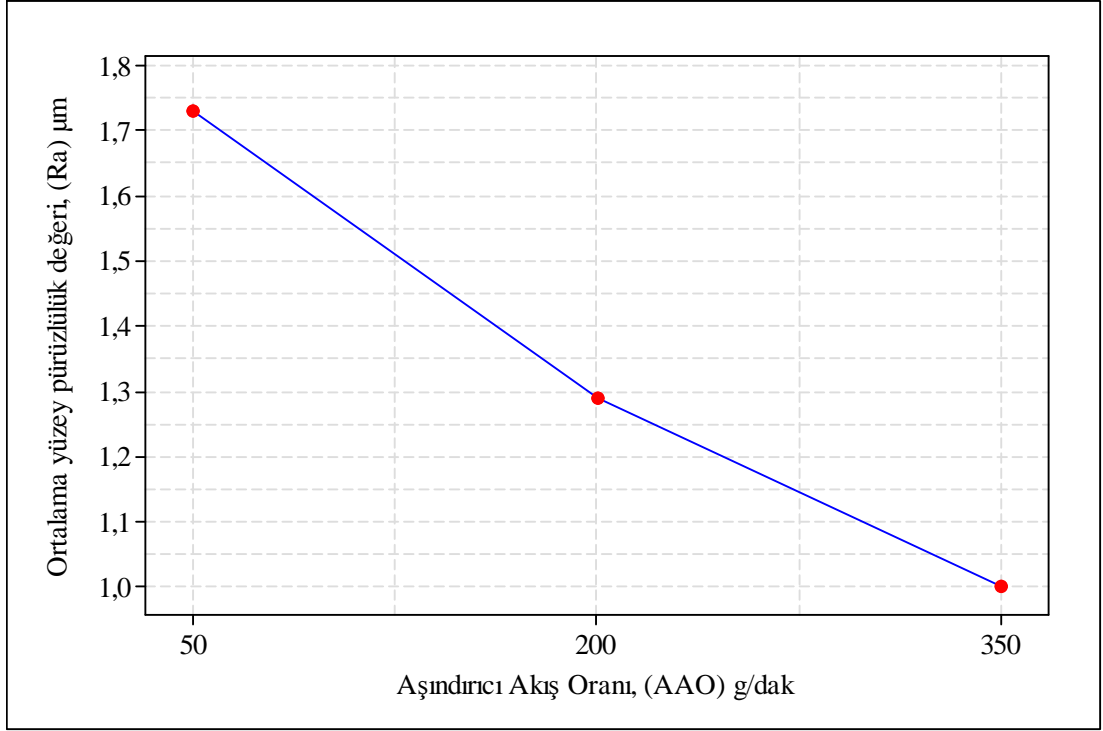


Şekil 5.22. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, nozul ilerleme miktarı (5, 25 ve 45 mm/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütmeli SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, AAO 50 g/dak, TD 500 dev/dak ve NYM 2 mm).

Düşük nozul ilerleme değerinin (5 mm/dak) kullanılması sonucu yüzeyde meydana gelen çizik izlerinin yoğunluğu 25 ve 45 mm/dak değerlerinde oluşan çizik izlere göre daha az olmuştur.

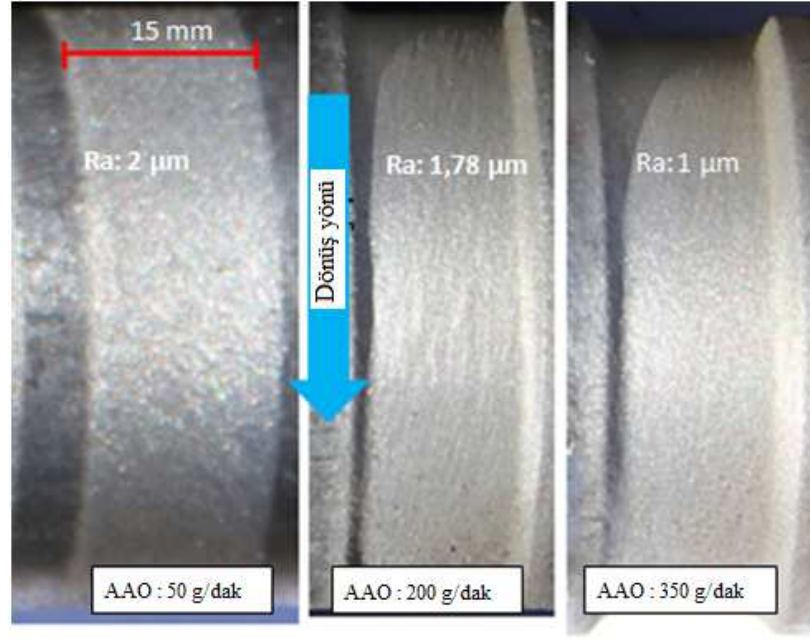
5.5.3. Aşındırıcı Akış Oranının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Aşındırıcı akış oranı değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü Şekil 5.23’te verilmiştir.



Şekil 5.23. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü, (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak ve NYM 2 mm).

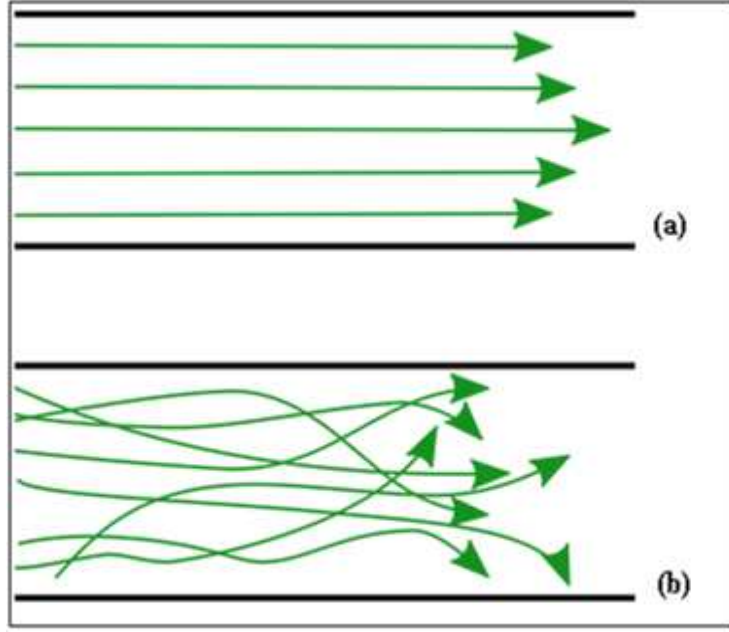
Aşındırıcı akış oranının artışı ortalama yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde ikinci etkili parametre olarak aşındırıcı akış oranı olmuştur (% 20). Selvan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, ortalama yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için aşındırıcı akış oranının artırılması gerektiğini belirtmiştir [98]. Aşındırıcı akış oranının artması aşındırıcı jetin daha homojen ve daha rijit kesici haline gelmesini sağlamaktadır [81-96]. Şekil 5.24'te aşındırıcı akış oranı değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne makro etkisinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.24. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde, aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 350 g/dak) parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren görüntü (NÇ 0,7 mm, TD 500 dev/dak ve NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak).

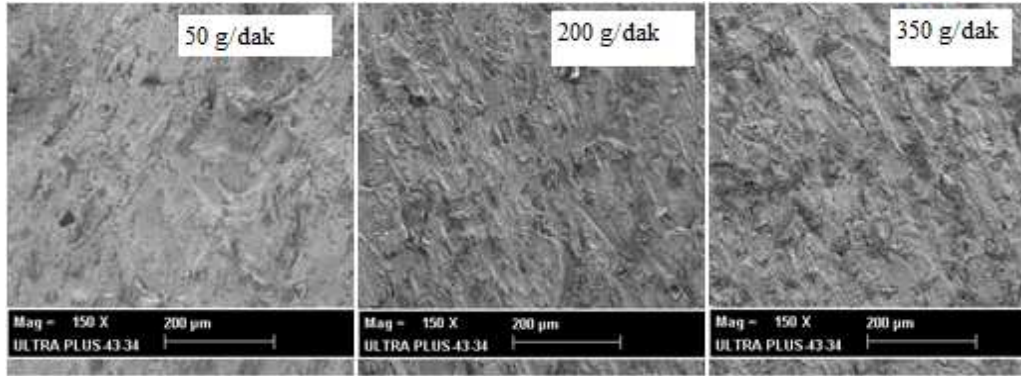
Düşük miktarda aşındırıcı akış oranı kullanımında içerisinde düzensiz hareket eden aşındırıcı parçacığın yapmış olduğu çarpma açısı da gelişi güzel olmaktadır [114-123]. Düşük miktarda aşındırıcı jet kullanımı sonucu iş parçası yüzeyinde makro ve mikro yüzey pürüzlülük değerlerinde bozulmalar olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular literatür ile uygunluk göstermiştir [81-96]. Aşındırıcı akış oranının 350 g/dak kullanılması sonucunda elde edilen makro ve mikro yüzey görüntüleri aşındırıcı akış oranının 200 g/dak ile 50 g/dak kullanılması sonrası elde edilen yüzey görüntülerinden daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir.

Nozul içerisinde aşındırıcı yoğunluğu arttıkça akışın laminarlığı artmaktadır (Şekil 5.25a) ve akış oranındaki artışa bağlı olarak akış içerisinde meydana gelen türbülanslı (çalkantılı, girdaplı) akışlar (Şekil 5.25b) azalmaktadır [114-125]. Düzgün aşındırıcı jet akışı ile daha düzgün yüzeyler elde edilebilmektedir [114-125].



Şekil 5.25. a) Laminar akış, b) Türbülanslı akış modelleri görüntüsü [115].

AISI 1050 çeliği iş parçasının üç farklı aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 355 g/dak) değerlerinde işlenmesi sonucu iş parçası yüzeylerinden alınmış SEM mikro görüntüleri Şekil 5.26'da verilmiştir.

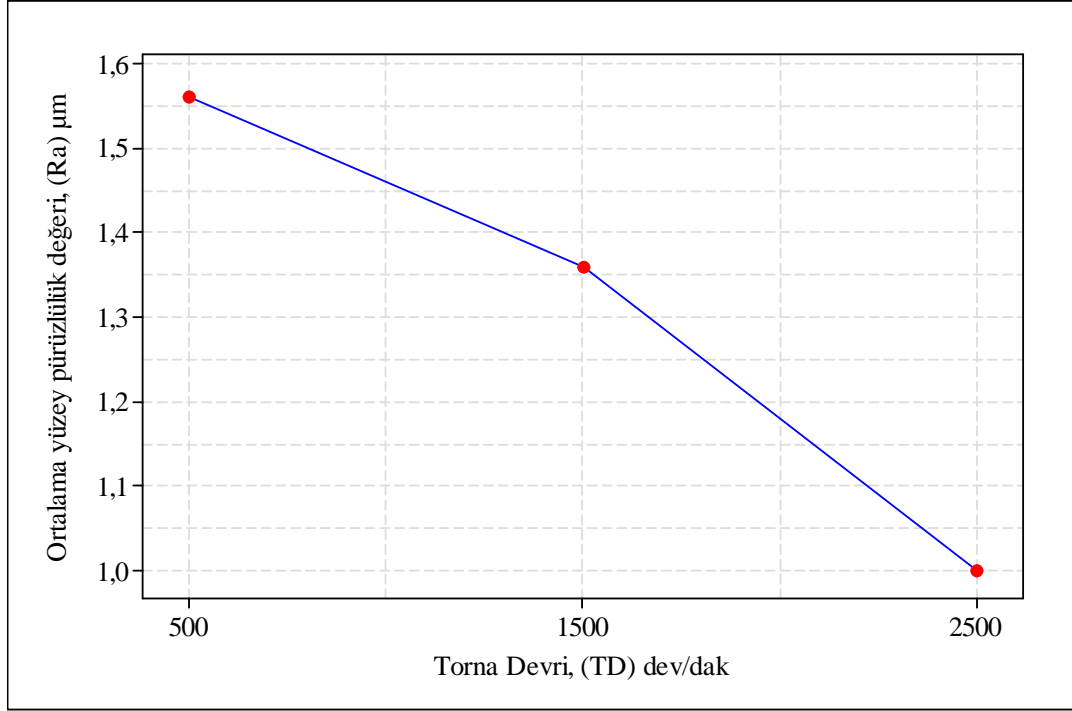


Şekil 5.26. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde farklı aşındırıcı akış oranı (50, 200 ve 355 g/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütmeli SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak ve NYM 2 mm).

Aşındırıcı akış oranının 350 g/dak değeri kullanılması sonucu yapılan ASJT işlemi sonucunda iş parçası yüzeyinde oluşan çizik ve derinliklerinin daha homojen ve düzgün olduğu tespit edilmiştir.

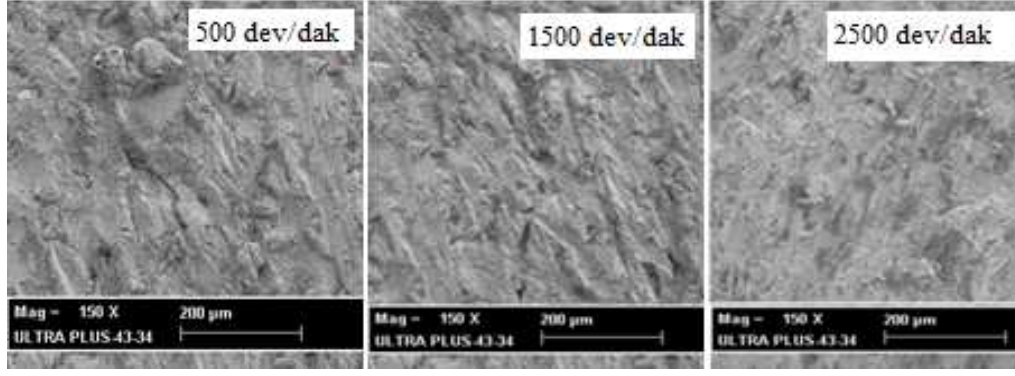
5.5.4. Torna Devrinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Torna devri değerinin değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde torna devri değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak ve NYM 2 mm).

Torna devri 500 dev/dak’dan 2500 dev/dak’ya (% 500) arttırıldığında yüzey pürüzlülüğü değeri % 56 iyileşme göstermiştir. İş parçası dönüş hızına bağlı olarak aşındırıcı jetin birim yüzeyde yapmış olduğu iş sayısı artmakta buna bağlı olarak işlenen yüzeyin kalitesi artmaktadır [81-96]. AISI 1050 çeliğinin Üç farklı torna devri (500, 1500 ve 2500 dev/dak) değerinde ASJT ile işlenmesi sonucu elde edilen iş parçası yüzey kalitesinin görüntü kontrolü için SEM görüntüsü alınmıştır. Alınan SEM görüntülerini gösteren görüntüler Şekil 5.28’de gösterilmiştir.

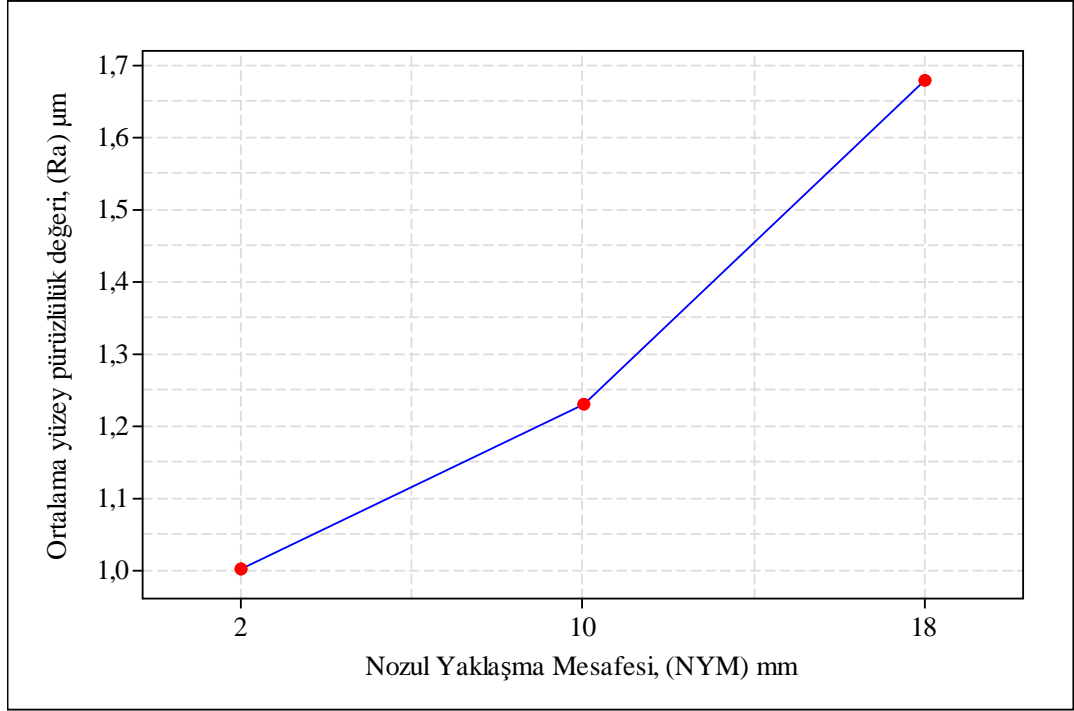


Şekil 5.28. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde torna devri (500, 1500 ve 2500 dev/dak) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150x büyütmeli SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve NYM 2 mm).

Torna devrinin artması ortalama yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir. Bunun nedeni, birim yüzeye etkileyen ASJ'nin yapmış olduğu iş artışıdır. Torna devrinin artışı ASJ'nin iş parçası üzerinde geçiş tekrar sayısını arttırmaktadır. Buna bağlı olarak iş parçası üzerinde defalarca yapılan erozyon ve süpürme işlemi sonucu yüzey kalitesinde iyileşmeler olmaktadır [81-96].

5.5.5. Nozul Yaklaşma Mesafesinin Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Nozul yaklaşma mesafesi değişiminin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini gösteren grafik Şekil 5.29'da verilmiştir.



Şekil 5.29. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak ve TD 2500 dev/dak).

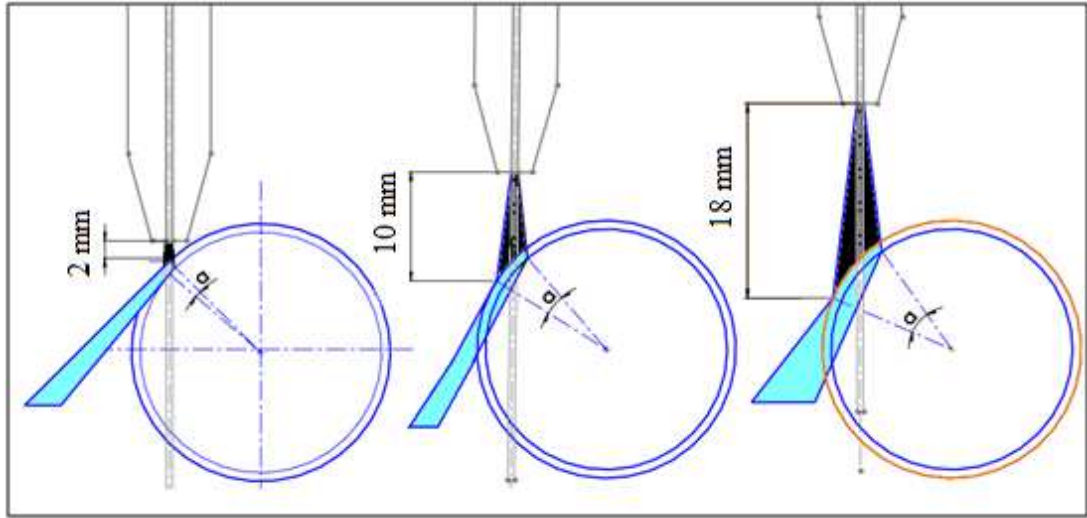
Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan bir diğer parametre ise % 14 etki oranı ile nozul yaklaşma mesafesi olmuştur. Nozul yaklaşma mesafesi ile ortalama yüzey pürüzlülüğü arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Nozul yaklaşma mesafesinin artması ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin artışına neden olmuştur. Nozul yüksekliğinin artması durumunda kinetik enerji azalır [81-102]. Kinetik enerjideki düşüğe bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde artış gözlenir [81-102]. Enerjideki düşüğe bağlı olarak ASJ çekirdeğinde bozulma oluşur. ASJ çekirdeğindeki bozulmaya bağlı olarak işlenen iş parçası yüzeyi formunda bozulmalar oluşur. Buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde artışlar meydana gelir [81-102].

Şekil 5.30'da ASJ ile iki boyutlu kesim işleminde iş parçası malzemesinin aynı kesme hızında nozul yaklaşma mesafesinin artmasıyla oluşan üst kerf oluşumu verilmiştir [124].



Şekil 5.30. ASJ işleminde nozul yaklaşma mesafesinin kerf oluşumuna etkisi [116].

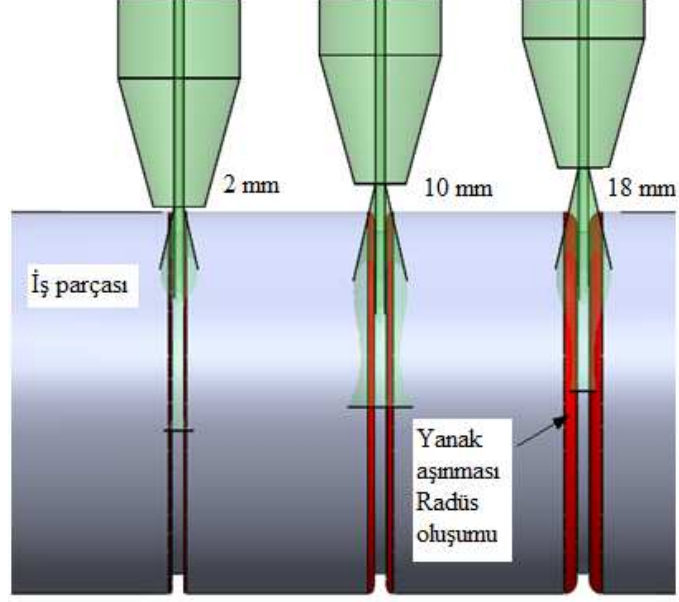
ASJT’de farklı nozul yüksekliklerinde oluşan aşındırıcı jetin iş parçasına çarpması ve ASJ’nin nozul yaklaşma mesafesi ile oluşturduğu huzme etkisi Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Nozul yaklaşma mesafesindeki artışa bağlı olarak basınç farkından dolayı aşındırıcı jette hüzme meydana gelmektedir [116].



Şekil 5.31. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesinin kerf oluşumuna etkisini gösteren görüntü.

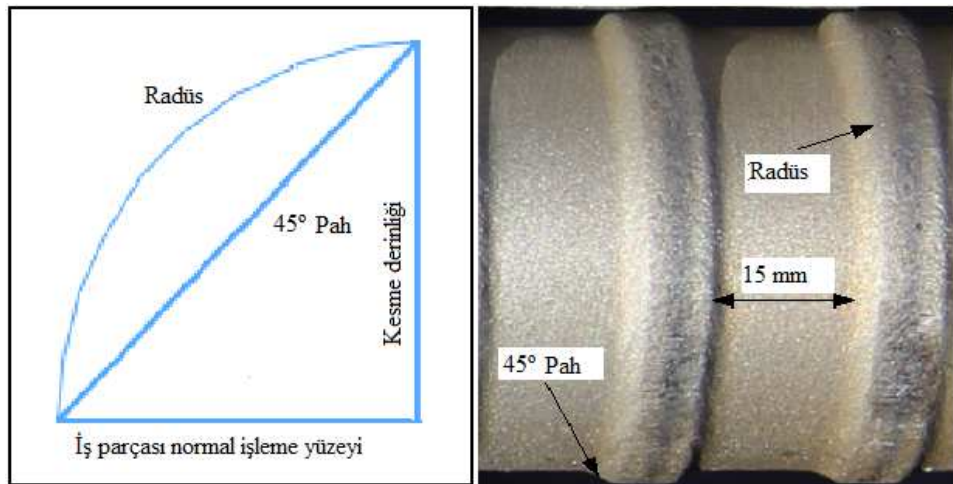
Bilgisayar Destekli Çizim (Computer Aided Design), CAD ortamında tasarlanan iki boyutlu görüntüde ASJ’nin nozul yüksekliğine bağlı olarak iş parçası yüzeyinde meydana getirdiği aşınmaların (pah ve radüs oluşumu) gösterimleri Şekil 5.32’de

verilmiştir. Şekil 5.32'deki gösterimde nozulun ilerlemediği ve iş parçasının sabit hızda döndüğü varsayılmıştır.



Şekil 5.32. ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesine bağlı olarak oluşan pah ve radüs oluşumu gösterimi.

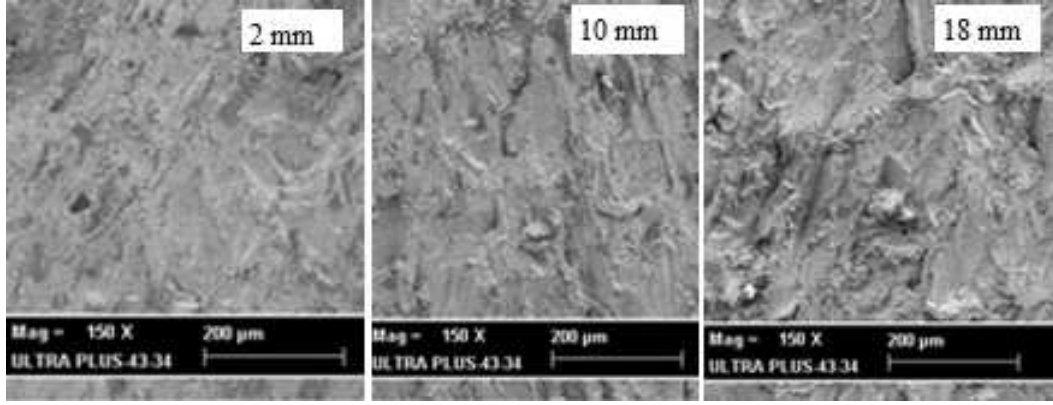
Nozul yaklaşma mesafesinin 18 mm kullanıldığı ASJT işleminde işlenen bölgede pah ve radüs oluşumunu gösteren görüntüsü Şekil 5.33'de verilmiştir.



Şekil 5.33. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde 18 mm nozul yaklaşma mesafesinde iş parçası yüzeyinde oluşan pah ve radüs oluşumu görüntüsü.

Nozul yaklaşma mesafesinin 2 mm değerinden 18 mm değerine artması hem ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırmış hem de boyuna tornalamadaki formun bozulmasına neden olmuştur.

Nozul yaklaşma mesafesindeki artışa bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğündeki artışı daha iyi yorumlamak için iş parçası üzerinde 150 x büyütme SEM görüntüleri alınmıştır. Mikro yapı incelemelerinde nozul yaklaşma mesafesinin üç farklı değerlerinde (2, 10 ve 18 mm) ASJT ile işlenerek elde edilmiş yüzeylere ait SEM görüntüleri Şekil 5.34'te verilmiştir.

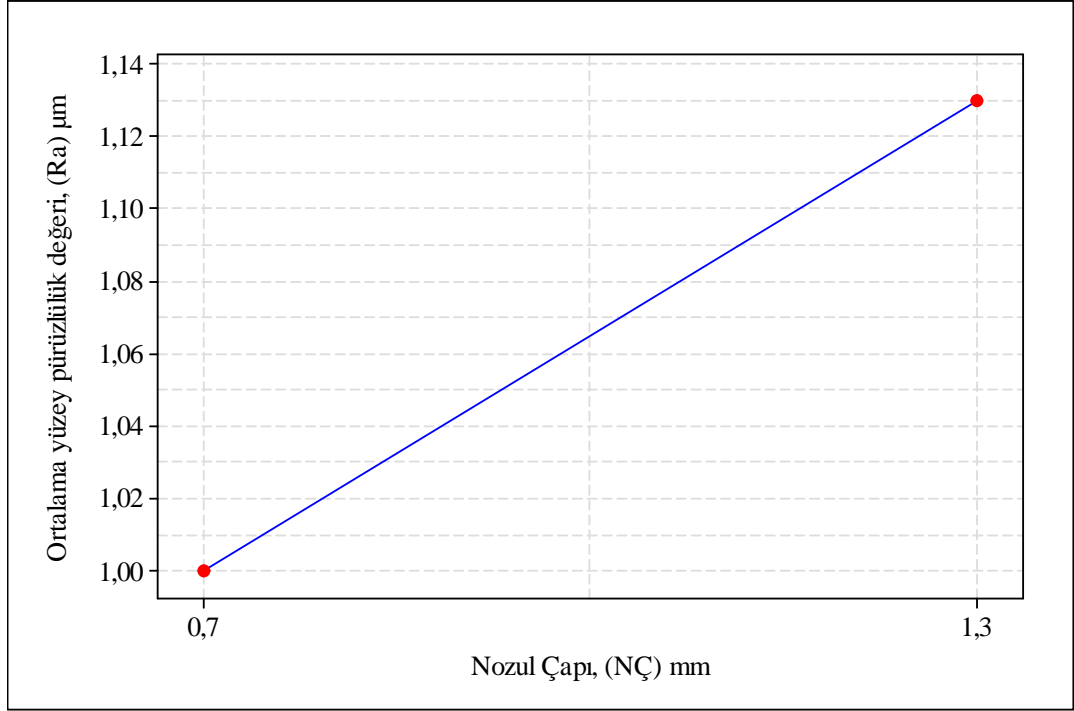


Şekil 5.34. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul yaklaşma mesafesi (2, 10 ve 18 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 150 x büyütme SEM görüntüsü (NÇ 0,7 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak).

Şekil 5.34'te verilen SEM görüntüsünden nozul yaklaşma mesafesinin artışıyla yüzeyde oluşan çukurların biçimleri ve derinliklerinin değiştiği açık bir şekilde görülmüştür.

5.5.6. Nozul Çapının Ortalama Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

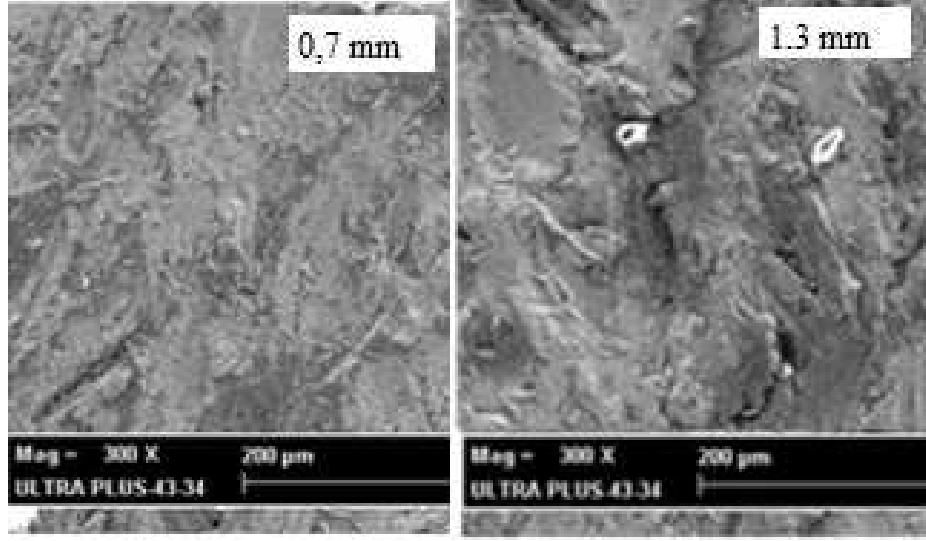
Nozul çapının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gösteren grafik Şekil 5.35'de gösterilmiştir.



Şekil 5.35. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren grafik görüntüsü (NİM 5 mm/dak, AAO 350 g/dak, NYM 2 mm ve TD 2500 dev/dak).

Nozul çapının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi istatistikî olarak % 6 oranındadır. Seçilen işleme parametrelerinden etki derecesi sıralamasında en düşük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Nozul yaklaşma mesafesi (2 mm), nozul ilerleme miktarı (5 mm/dak), aşındırıcı akış oranı (50 g/dak) ve torna devri (500 dev/dak) sabit parametreler kullanılarak yapılan ASJT işleminde nozul çapının 0,7 mm den 1,3 mm ye (% 86) artırıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğünde % 14 artış tespit edilmiştir. En iyi Ra değeri 0.7 mm nozul çapı değerinde elde edilmiştir. 1.3 mm nozul çapı kullanıldığında ise daha pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. 1.3 mm nozul çapı kullanıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerinin artışı oluşan aşındırıcı jet çapının daha büyük olması ve geniş çiziklerin oluşmasına neden olduğu ile açıklanabilir. Nozul çapı artışının mikro yüzey morfolojisine etkisini gösteren 300x büyütme SEM görüntüleri Şekil 5.36'da verilmiştir.



Şekil 5.36. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapı (0,7 ve 1,3 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 300x büyütmeli SEM görüntüsü (NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak).

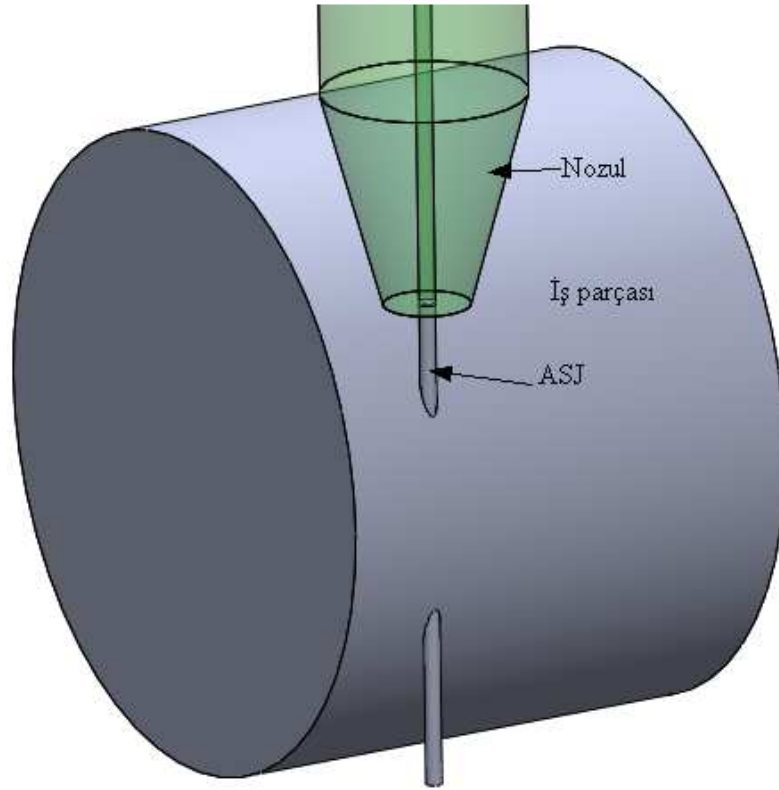
Nozul çapının 0,7 mm den 1,3 mm ye artırıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 300x büyütmeli SEM görüntüsü Şekil 5.37’de verilmiştir.



Şekil 5.37. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT işleminde nozul çapı (1,3 mm) değerlerinin mikro yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren 300x büyütmeli SEM görüntüsü (NYM 2 mm, NİM 5 mm/dak, AAO 50 g/dak ve TD 500 dev/dak).

Şekil 5.37’de nozul çapı değerinin 1,3 mm kullanıldığında daha pürüzlü ve çukur derinliklerin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Görüntülerinin genelinde yüzeyde oluşan çukur kalıplarının sebebi, aşındırıcı jetin düşey, iş parçasının dairesel hareketi sonucunda yüzeyde ASJ sürekli farklı çarpma açılarında bombardıman yapması sonucu oluşmaktadır [117-126]. ASJ’nin yüzeye çarpma açısı işleme parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir.

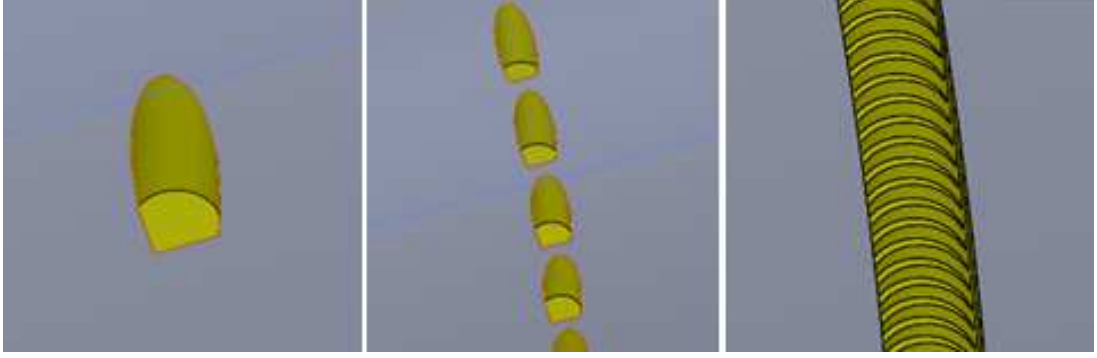
Şekil 5.38’de yüzeyde oluşan çukur modellerinin oluşumunu açıklayan gösterim verilmiştir.



Şekil 5.38. ASJT işleminde ASJ’nin iş parçasını döndürülmediği durumda kesme durumu görüntüsü.

Şekil 5.38’de iş parçasının dönmediği varsayılmıştır. Normal iki boyutlu kesimlerde iş parçası kesildikten sonra ASJ iş parçası altından çıkarak su jeti havuzunda jet akışı sona erer [81-96].

Şekil 5.39’da erozyonun oluşumunun meydana geliş safhaları verilmiştir.

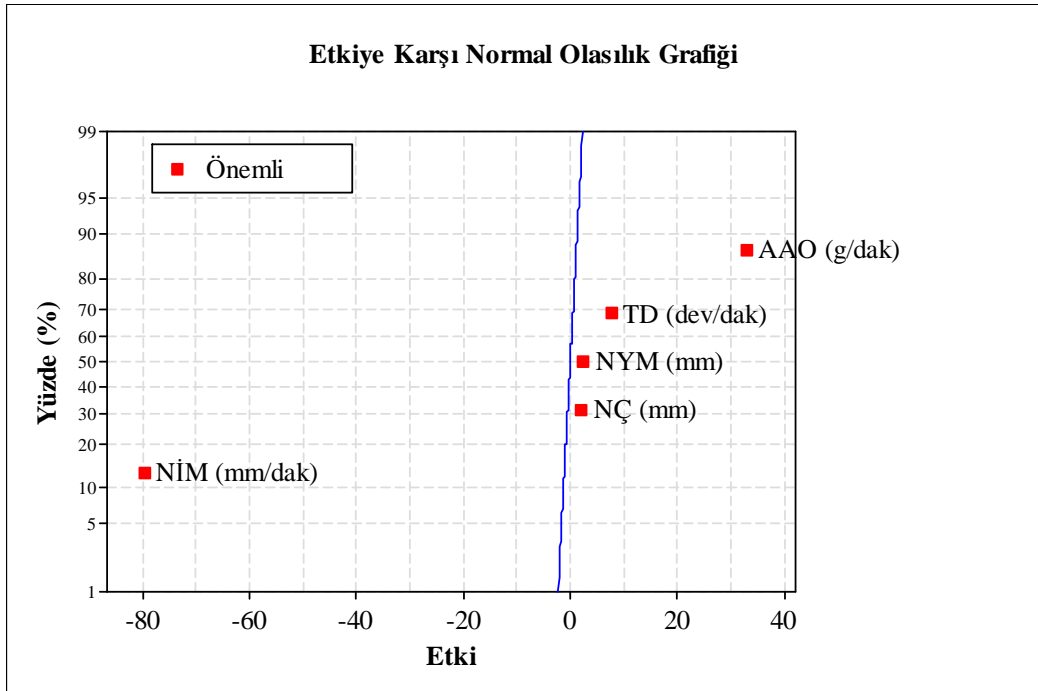


Şekil 5.39. Yüzeyde oluşan çukurların oluşum senaryosu gösterimi.

ASJT işleminde ise iş parçası döndürüldüğü için Şekil 5.39’da gösterilen işlem saniyeler içinde sürekli tekrarlanmasıyla silindirik iş parçası üzerinde erozyonlar oluşmaktadır.

5.6. TALAŞ KALDIRMA ORANI İÇİN YAPILAN TAM FAKTÖRİYEL ANALİZİ

Talaş kaldırma oranı verileri için yapılan tam faktöriyel analiz sonucunda elde edilen normal olasılık grafiği Şekil 5.40’da verilmiştir.



Şekil 5.40. Talaş kaldırma oranı için parametrelerin normal olasılık grafiği.

Şekil 5.40'da normal olasılık grafiğinde parametreler doğrusal çizginin sağında ve solunda oluşmuştur. İşleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı üzerinde etkilerinin düzeylerini belirlemek için verilere % 95 güven aralığında varyans analizi uygulanmıştır. Uygulanan varyans analizi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Talaş kaldırma oranı için yapılan varyans analiz sonuçları tablosu.

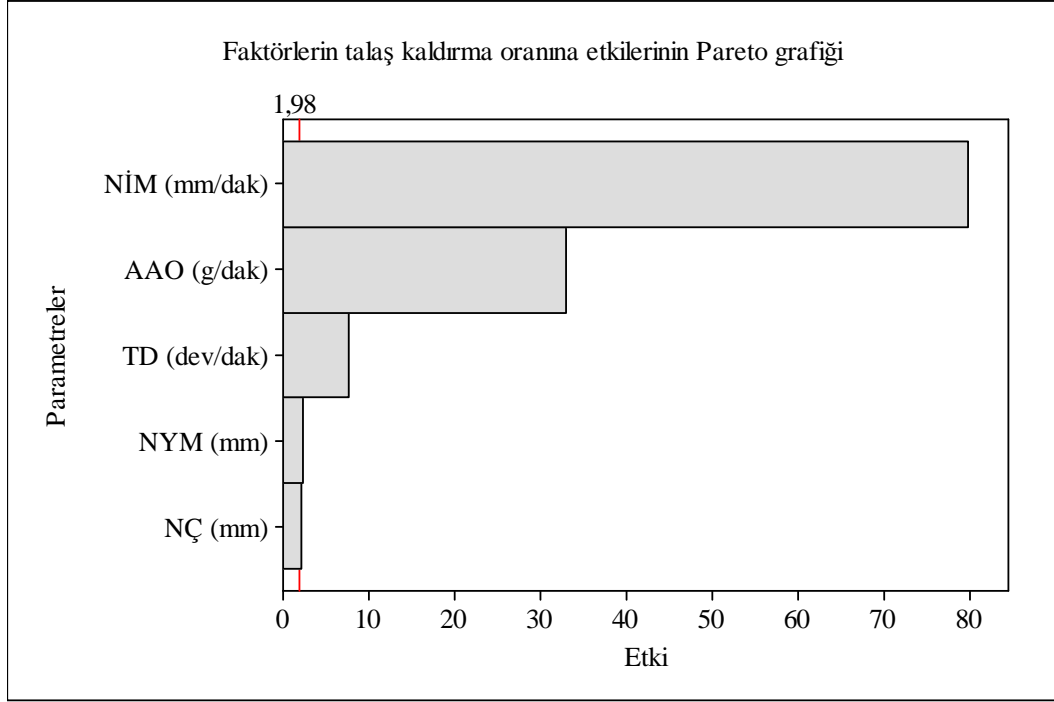
Kaynak	SD	KT	KO	F	Etki (%)
Nozul Çapı (mm)	1	24,8	24,8	4,350	0,05
Nozul İlerleme Miktarı (mm/dak)	2	36067,2	18033,6	3163,790	82,85
Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)	2	6191,5	3095,7	543,105	14,22
Nozul Yaklaşma Mesafesi (mm)	2	33,9	16,9	2,964	0,07
Torna Devri (dev/dak)	2	340,9	170,4	29,894	0,78
Hata	152	871,2	5,7	-----	2,00
Toplam	161	43529,5			100,00

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, KO: Kareler ortalaması,

F: F oranı

Varyans analizinde beş bağımsız parametrenin nozul çapı, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi ve torna devrinin bağımlı değişken olan talaş kaldırma oranına etkisinin olup olmadığı analiz edilmiştir. Talaş kaldırma oranı üzerinde % 10'dan daha büyük etkiye sahip ana etkiler % 83 oranı ile nozul ilerleme miktarı, % 14 oranı ile aşındırıcı akış oranı olmuştur.

Talaş kaldırma oranı üzerinde işleme parametrelerinin etki sıralamasını tespit etmek için pareto grafiği oluşturulmuştur (Şekil 5.41).



Şekil 5.41. İşleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı üzerindeki etkilerinin pareto analiz grafiği.

Pareto analiz grafiğinde (Şekil 5.41) eşik çizgisini geçen parametreler talaş kaldırma oranını etkileyen parametrelerdir. Pareto grafiğinde 0,05 anlamlılık düzeyinde eşik değeri 1,98'dir. Eşik değerini geçen parametreler nozul çapı, nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi ve torna devri parametreleridir. Talaş kaldırma oranı miktarını en çok etkileyen parametre nozul ilerleme miktarı olmuştur.

5.6.1. Talaş Kaldırma Oranı İçin Yapılan Regresyon Analizi

Yapılan doğrusal regresyon analiz sonucuna göre talaş kaldırma oranı değeri Denklem 5.2 ile elde edilmiştir.

$$\text{Talaş Kaldırma Oranı (mm}^3\text{/dak)} = 41,8 + 1,30 \text{ Nozul Çapı (mm)} - 0,914 \text{ Nozul İlerleme Miktarı (mm/dak)} + 0,0504 \text{ Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)} + 0,0700 \text{ Nozul Yaklaşma Mesafesi (mm)} + 0,00178 \text{ Torna Devri (dev/dak)} \quad (5.2)$$

Talaş kaldırma oranı için yapılan doğrusal regresyon analiz sonucuna göre talaş kaldırma oranı veren denklem katsayıları Çizelge 5.5'de verilmiştir. Elde edilen

denklemin standart sapması, $S= 2,3941$ ve belirleme katsayısı, $R^2=0,98$ olarak elde edilmiştir.

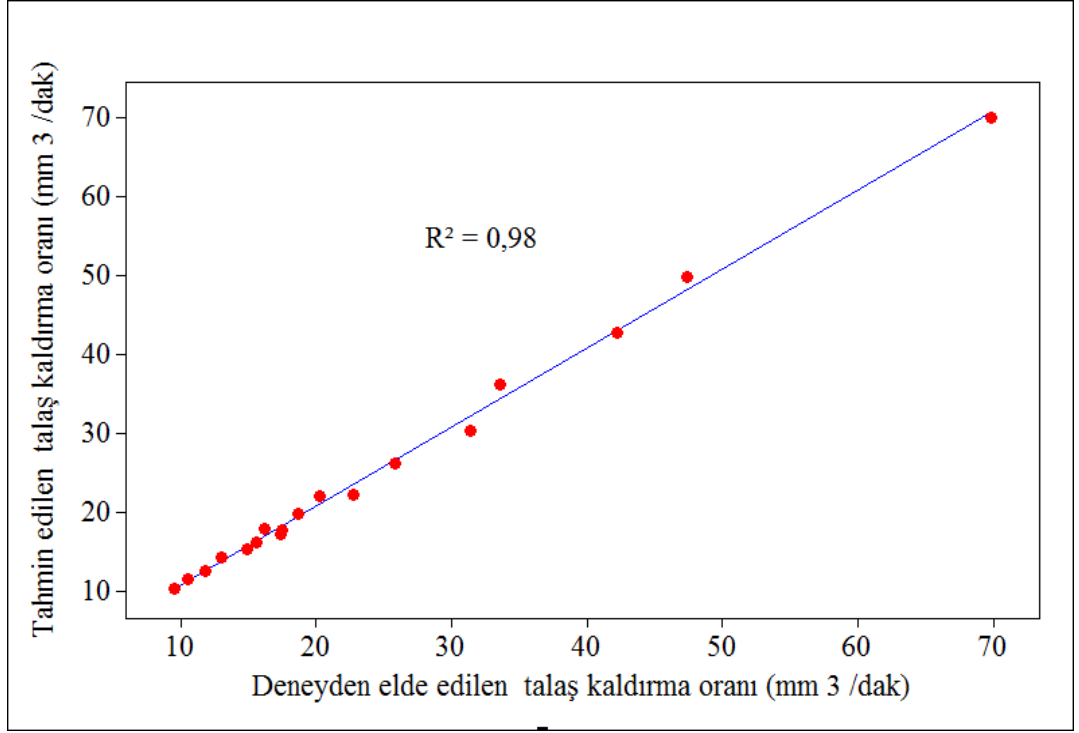
Çizelge 5.5. Talaş kaldırma oranı için doğrusal regresyon analizine ait katsayı tablosu.

Tahminci Parametre	Katsayı	Katsayı Standart Hatası	T	P
Sabit	41,8191	0,8943	46,76	<0,001
NÇ (mm)	1,3045	0,6237	2,09	0,038
NİM (mm/dak)	-0,9137	0,0114	-79,74	<0,001
AAO (g/dak)	0,0504	0,0015	33,00	<0,001
NYM (mm)	0,0699	0,0286	2,44	0,016
TD (dev/dak)	0,0017	0,0002	7,75	<0,001

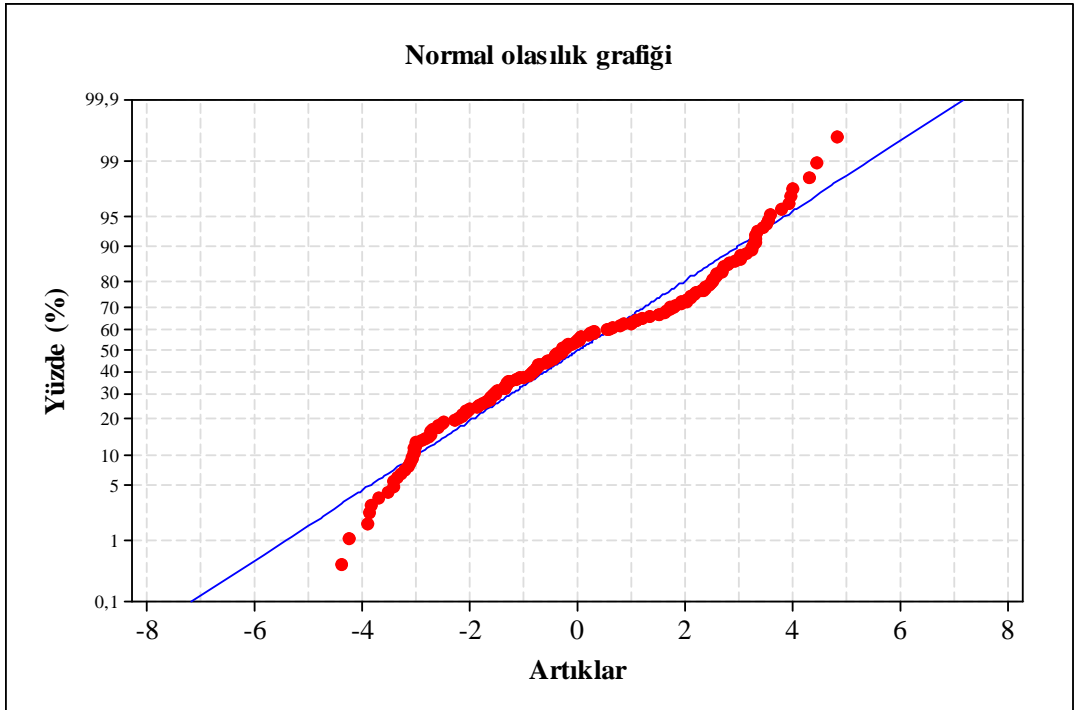
Talaş kaldırma oranı için birinci derece regresyon denklemi % 95 anlamlılık seviyesinde işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı üzerindeki anlamlı etkilerini % 98 seviyesinde açıklamaktadır. Deneylerde elde edilen talaş kaldırma oranı değerleri ile regresyon denkleminde elde edilen değerlerin karşılaştırılması yapılmış ve artıklar bulunarak her deneydeki % hata oranları verilmiştir.

5.6.2. Talaş Kaldırma Oranı İçin Geliştirilen Doğrusal Regresyon Denklemi Modelinin Uygunluk Kontrolü

Talaş kaldırma oranı için geliştirilen matematik model ile deney sonuçları karşılaştırılmış grafiksel olarak Şekil 5.42’de verilmiştir. Talaş kaldırma oranı için normal olasılık eğrisi Şekil 5.43’te verilmiştir.

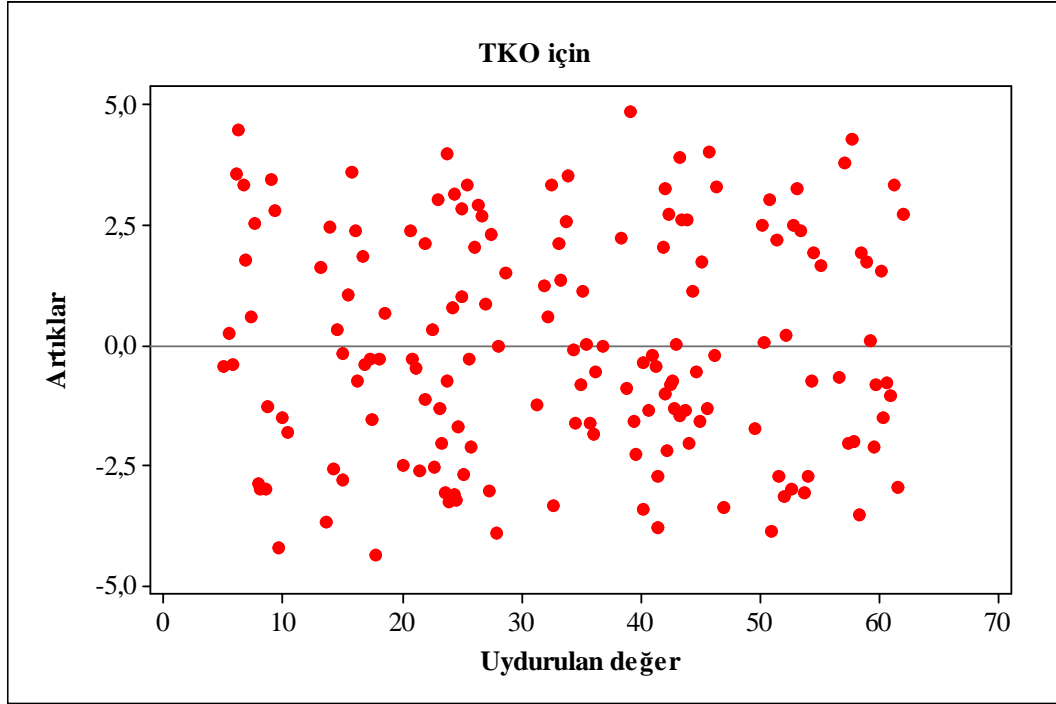


Şekil 5.42. Deneysel ve geliştirilen tahmini verilerin dağılımını gösteren grafik görüntüsü.



Şekil 5.43. Talaş kaldırma oranı için normal olasılık eğrisi görüntüsü.

Şekil 5.42’de, talaş kaldırma oranı için geliştirilen matematik modelin yeterli olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.43’te tüm noktaların çizgi etrafında olduğu tespit edilmiştir. Talaş kaldırma oranı için geliştirilen matematik modelin ve deney verilerinin doğruluğunu göstermektedir. Talaş kaldırma oranı için uydurulan değerlerin artıklara karşı grafiği Şekil 5.45’de verilmiştir.



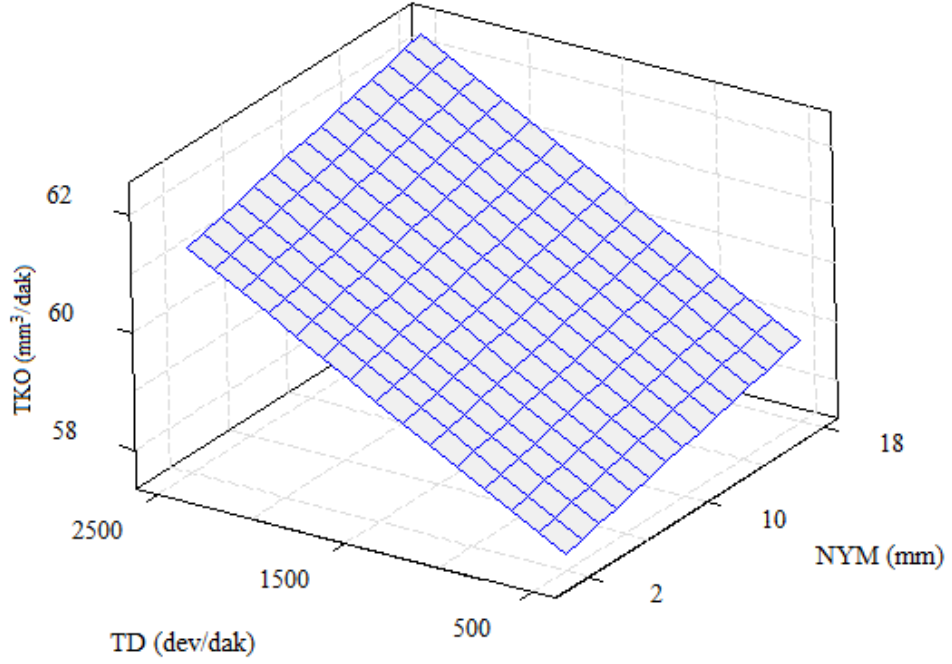
Şekil 5.44. Talaş kaldırma oranı için artık değerler grafiği.

Şekil 5.44’te verilen grafikte tüm noktalar artık değerlerin sıfır olduğu yatay çizginin altında ve üstünde rastgele dağılım göstermiştir. Bu durum modelin uygunluğunu göstermiştir. Grafikte tüm noktalar -5 ile +5 değerleri arasında olup, aşırı sapan bir değer saptanmamıştır.

5.6.3. İşleme Parametrelerinin Talaş Kaldırma Oranına Etkisini Gösteren Yüzey Grafik Analizleri

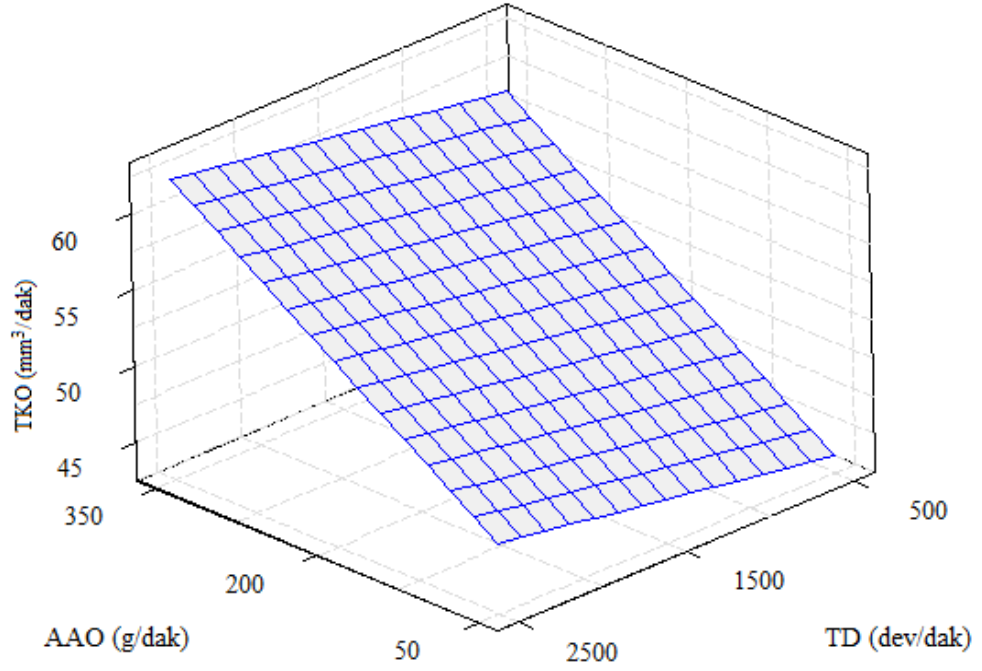
İşleme parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisini analiz etmek için üç boyutlu yüzey grafikleri elde edilmiş ve elde edilen grafikler yorumlanmıştır.

Torna devri ile nozul yaklaşma mesafesinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.45’de, aşındırıcı akış oranı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.46’da verilmiştir.



Şekil 5.45. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde torna devri ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

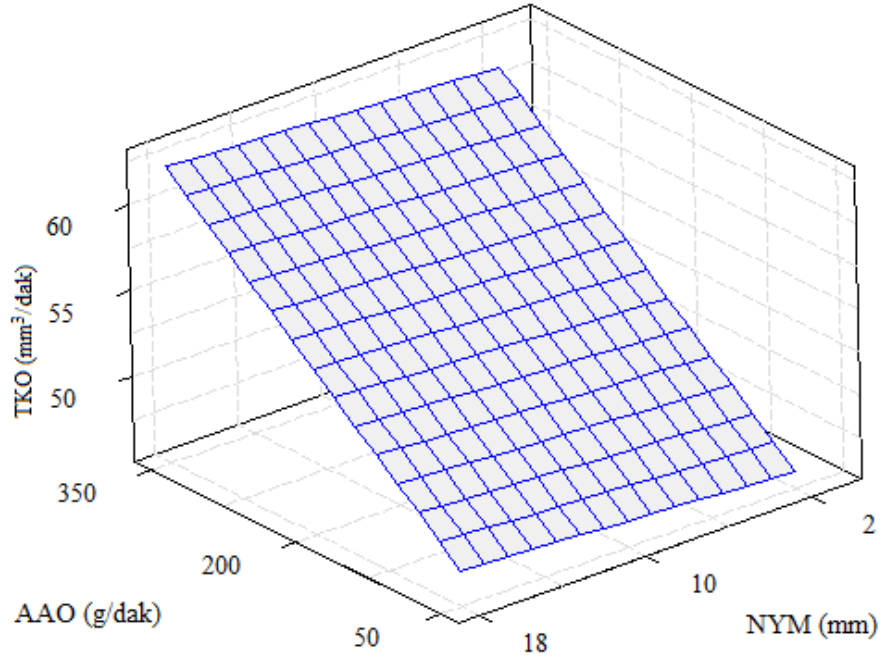
Şekil 5.45’deki grafikte nozul yaklaşma mesafesi 2 mm’de iken torna devri değeri 500 dev/dak’dan 2500 dev/dak değerine arttırıldığında talaş kaldırma oranında % 8 artış meydana gelmiştir. Torda devri 500 dev/dak değerinde sabit iken nozul yaklaşma mesafesi 2 mm’den 18 mm’ye arttırıldığında talaş kaldırma oranı % 9 artış göstermiştir. Torna devrinin talaş kaldırma oranına etkisi nozul yaklaşma mesafesinden % 1 daha fazla olmuştur.



Şekil 5.46. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, NYM 18 mm).

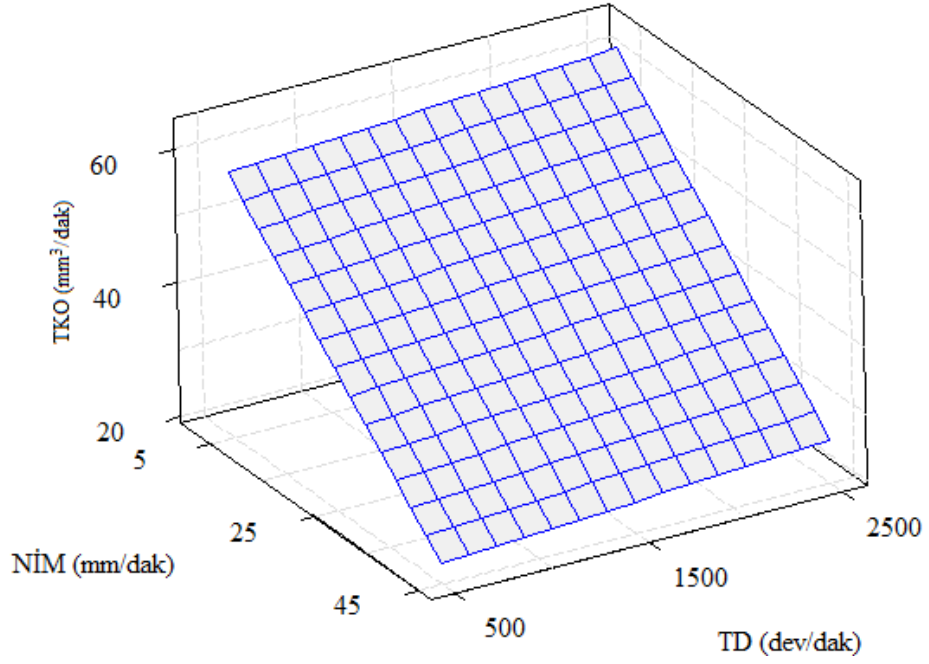
Şekil 5.46’da verilen grafikte, torna devri ile aşındırıcı akış oranı parametrelerin her ikisinin artmasıyla aşındırıcı akış oranı artış göstermiştir. Torna devrinin 500 dev/dak değerinde sabit iken aşındırıcı akış oranı 50 g/dak’dan 350 g/dak değerine arttırıldığında talaş kaldırma oranı % 31 artmıştır. Aşındırıcı akış oranı değeri 50 g/dak değerinde sabit iken torna devri değeri 500 dev/dak’dan 2500 dev/dak değerine arttırıldığında talaş kaldırma oranında % 5 artış meydana gelmiştir. Aşındırıcı akış oranının talaş kaldırma oranı üzerindeki etkisi torna devri değişimindeki etkiden % 26 daha büyük olmuştur.

Aşındırıcı akış oranı ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.47’de, nozul ilerleme miktarı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.48’de verilmiştir.



Şekil 5.47. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde aşındırıcı akış oranı ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, TD 2500 dev/dak).

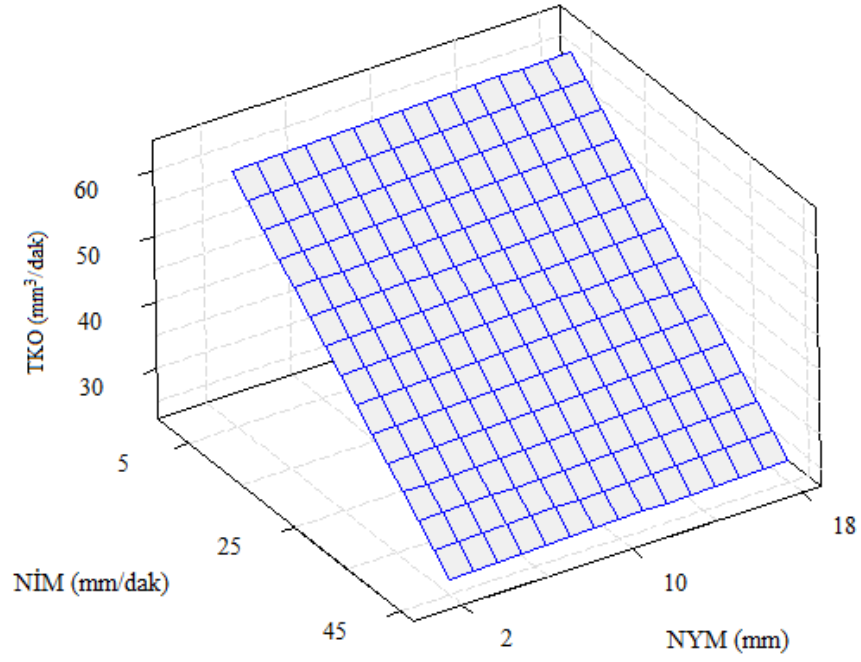
Şekil 5.47'deki grafikte, nozul yaklaşma mesafesinin talaş kaldırma oranına etkisi aşındırıcı akış oranından çok daha düşük olmuştur. Nozul yaklaşma mesafesi 2 mm'den 18 mm'ye çıkartıldığında talaş kaldırma oranı % 8 artış göstermiştir.



Şekil 5.48. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ile torna devri parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NYM 18 mm, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

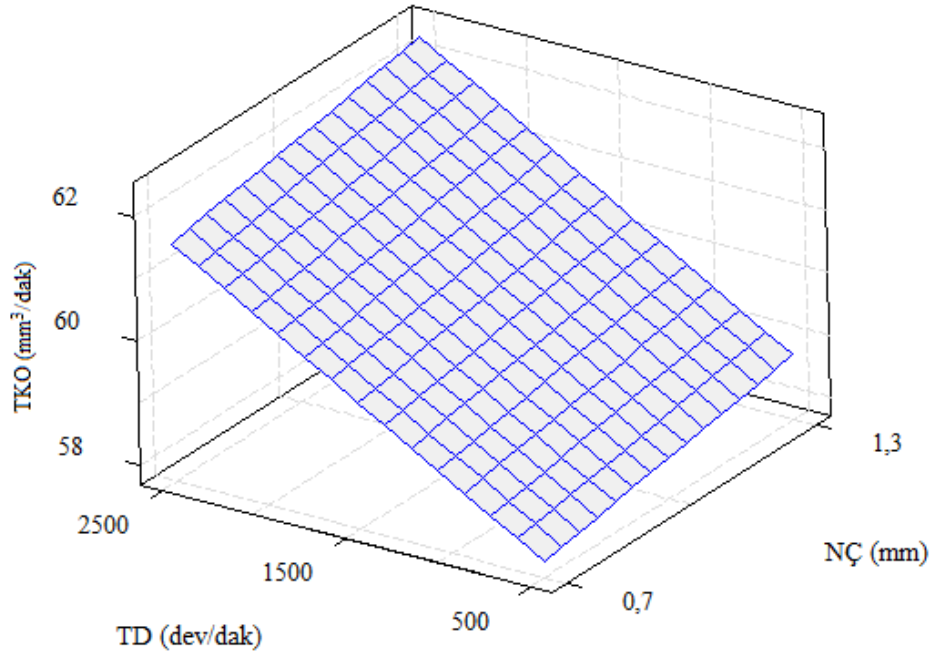
Şekil 5.48'deki grafikte, nozul ilerleme miktarının artmasıyla talaş kaldırma oranında düşüş tespit edilmiştir. Torna devri değerinin 500 dev/dak'dan 2500 dev/dak değerine artırılmasıyla talaş kaldırma oranında % 7 artış olmuştur.

Nozul ilerleme miktarı ile nozul yaklaşma mesafesi parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.49'da, torna devri ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.50'de verilmiştir.



Şekil 5.49. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul ilerleme miktarı ile nozul yaklaşma mesafesinin parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (TD 2500 dev/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

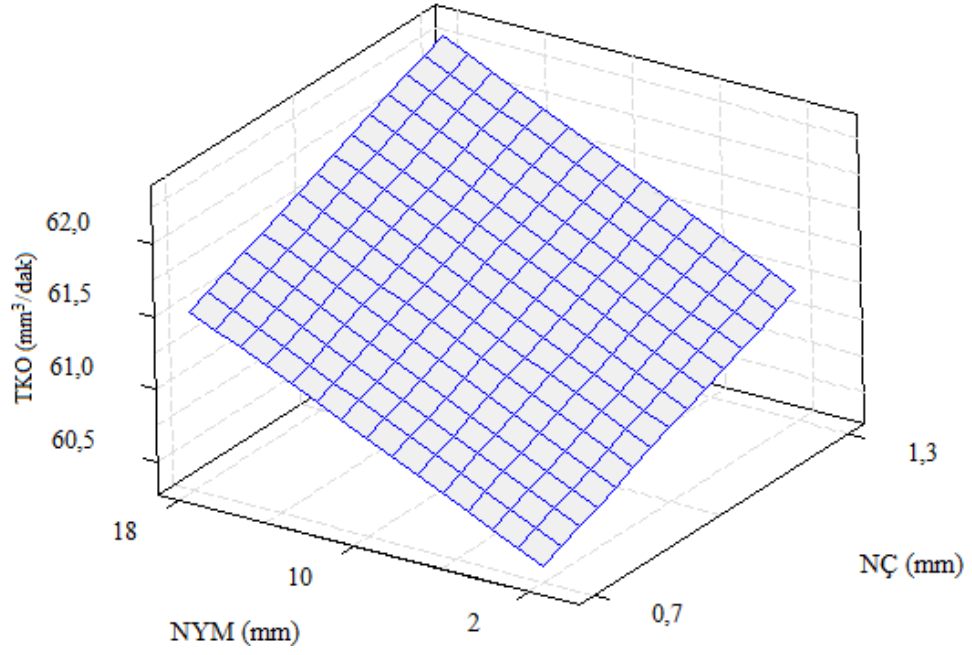
Nozul yaklaşma mesafesi 2 mm'den 18 mm'ye artmasıyla kaldırma oranını % 8 artırmıştır. Nozul ilerleme miktarının 5 mm'dak değerinden 45 mm/dak değerine artmasıyla talaş kaldırma oranında % 55 düşüş tespit edilmiştir.



Şekil 5.50. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde Torna devri ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

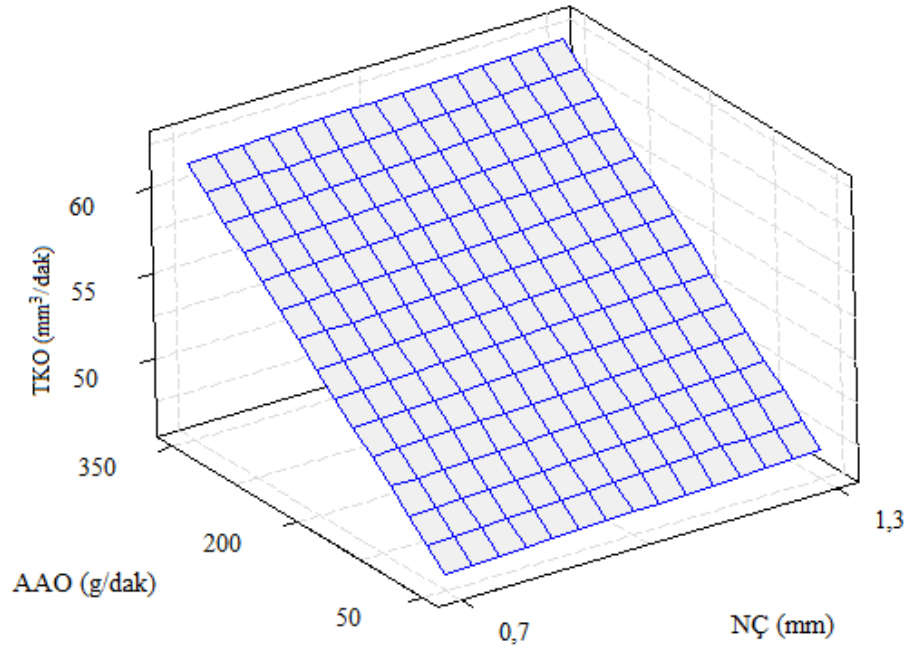
Şekil 5.50'deki grafikte nozul çapı değeri 0,7 mm olduğu zaman torna devri değeri 500 dev/dak'dan 2500 dev/dak değerine çıkartıldığında talaş kaldırma oranında % 4 artış tespit edilmiştir. Torna devrinin talaş kaldırma oranına etkisi nozul çapı değeri değişiminden daha çok olmuştur. Talaş kaldırma oranının yüksek olması için nozul çapının 1,3 mm ve torna devri değerinin 2500 dev/dak olması en uygun parametre değerleri olduğu tespit edilmiştir.

Nozul yaklaşma mesafesi ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.51'de, aşındırıcı akış oranı ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü Şekil 5.52'de verilmiştir.



Şekil 5.51. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde nozul yaklaşma mesafesi ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, TD 2500 dev/dak, AAO 350 g/dak).

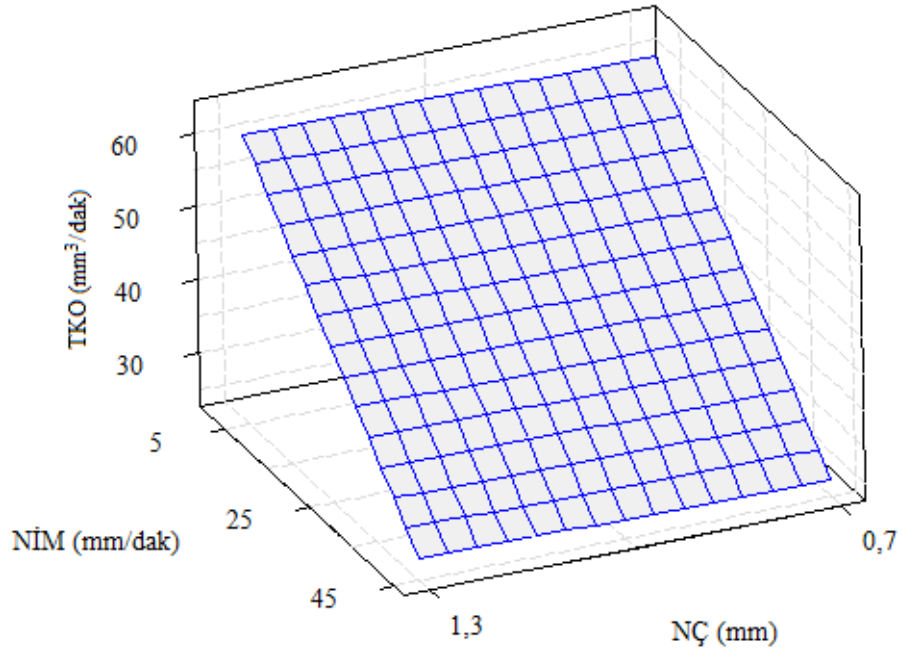
Şekil 5.51'deki grafikte nozul yaklaşma mesafesinin ve nozul çapı değerinin artması talaş kaldırma oranını artırmıştır. Nozul yaklaşma mesafesinin artması talaş kaldırma oranını arttırdığı tespit edilirken iş parçası yüzey formunda bozulma tespit edilmiştir. Bu nedenle, düzgün yüzey formu istenmesi durumunda nozul yaklaşma mesafesinin düşük tutulması gerektiği tespit edilmiştir. Nozul çapı 1,3 mm değerinde en yüksek talaş kaldırma oranı elde edilmiştir.



Şekil 5.52. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde T aşındırıcı akış oranı ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

Şekil 5.52'deki grafikte nozul çapının artması talaş kaldırma oranına etkisi aşındırıcı akış oranının göre etkisi düşük olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.53'te nozul ilerleme miktarı ile nozul çapı parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin üç boyutlu düzlemsel yüzey grafik görünümü verilmiştir.



Şekil 5.53. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde Torna devri ile nozul yaklaşma mesafesinin parametrelerinin talaş kaldırma oranına etkisinin yüzey grafiği görüntüsü (NİM 5 mm/dak, NÇ 1,3 mm, AAO 350 g/dak).

Şekil 5.53'deki grafikte nozul ilerleme miktarının talaş kaldırma oranına etkisi nozul çapının talaş kaldırma oranına etkisinden % 55 daha yüksek olmuştur.

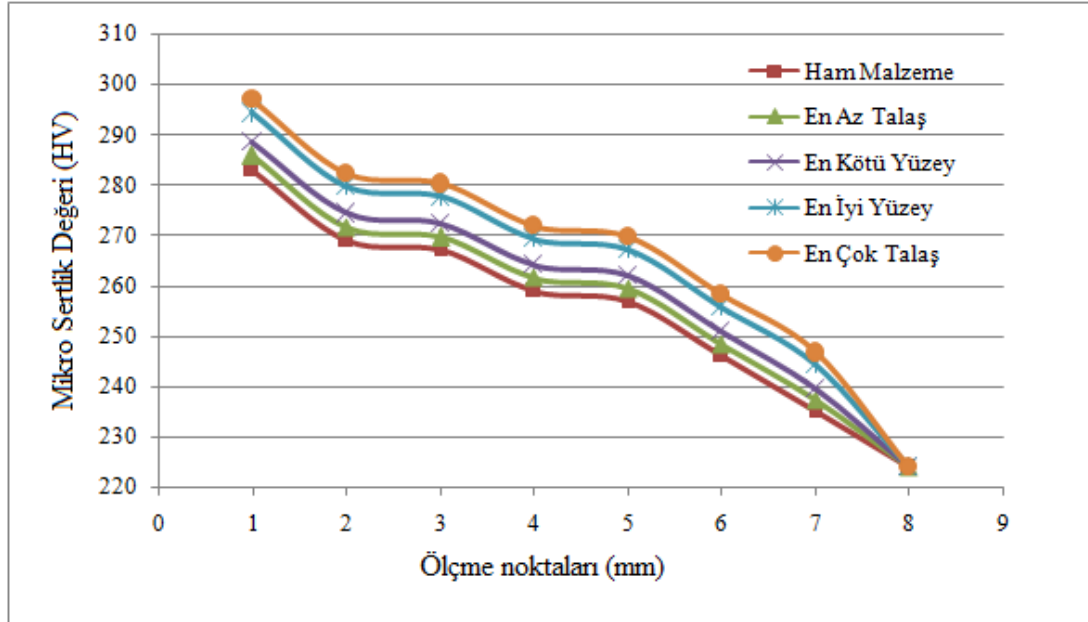
5.7. MİKRO SERTLİK ANALİZİ

ASJT ile işlenmiş AISI 1050 çeliği iş parçası numunelerinden işleme sonrası numunenin dış ve iç bölgesinde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. AISI 1050 çeliği numunelerinin ASJT ile işlenmesinde işleme parametrelerinin mikro sertlik değerlerine olan etkilerini inceleyebilmek için dört ana çıktı üzerinden genel değerlendirme yapılmıştır. Çizelge 5.6'da mikro sertlik parametrelerinin ölçüldüğü sonuç şartları, parametre karşılıkları ve mikro sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.6. AISI 1050 çeliği iş parçasının ASJT ile işlenmesinde mikro sertlik ölçümü yapılan numunelerin referans parametre değerleri ve mikro sertlik değerleri.

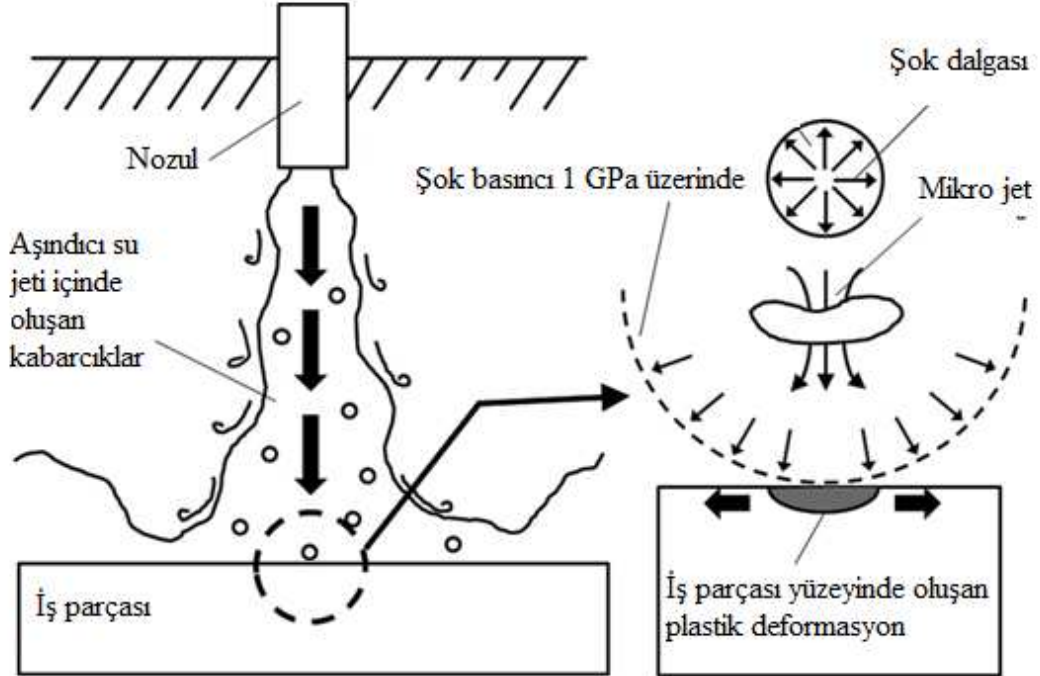
Özelliği	Deney No	Nozul Çapı (mm)	Nozul İlerleme Miktarı (mm/dak)	Aşındırıcı Akış Oranı (g/dak)	Nozul Yaklaşma Mesafesi (mm)	Torna Devri (dev/dak)	Mikro Sertlik Değeri (HV)
Ham Malzeme	-----	-----	-----	-----	-----	-----	283
En İyi Yüzey	21	0,7	5	350	2	2500	298
En Kötü Yüzey	142	1,3	45	50	18	500	286
En Çok Talaş	108	1,3	5	350	18	2500	304
En Az Talaş	55	0,7	45	50	2	500	287

ASJT ile dört farklı sonuç koşullarında (işlenmemiş ham malzeme, en az talaş kaldırma oranında, en kötü yüzey, en iyi yüzey ve en çok talaş kaldırma oranında) işlenmiş AISI 1050 çeliği numunelerinin mikro sertlik değişim grafiği Şekil 5.54'te verilmiştir.



Şekil 5.54. AISI 1050 ASJT ile işlenmesinde sertlik değişim grafiği.

ASJT ile işlemede aşındırıcı partiküllerin iş parçası yüzeyine bombardımanı esnasında yüzeyde plastik deformasyon olmaktadır (Şekil 5.55) [117-126].



Şekil 5.55. ASJ işleminde işlenen yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon oluşumu görüntüsü [126].

Buna bağlı olarak, işlenen yüzeyde aşındırıcı akış oranı değerinin 350 g/dak kullanıldığı değerlerde mikro sertlik değerleri artış görülmüştür. Şekil 5.54'te grafikte ham malzemenin mikro sertlik değerleri ASJT ile işlenmiş iş parçalarında ölçülen mikro sertlik değerlerinden daha düşük değerde ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak, ASJT ile işleme koşullarının hidrodinamik bir işleme yöntemi olmasıyla işlenen parça yüzeyinde aşındırma süreciyle birlikte yüzeyde artık gerilmelerin oluşmasına ve buna bağlı olarak mikro sertlik parametrelerinin yüksek olmasına neden olmuştur. En çok etki % 5 artışla en çok talaşın elde edildiği parametrelerin değerlerinde ölçülmüştür. Elde edilen bulgular literatürle benzerlik göstermektedir [81-96, 117-126].

5.8. PARAMETRELERİN OPTİMİZASYONU

Yapılan tam faktöriyel analizler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri ve talaş kaldırma oranının en yüksek değeri için ASJT parametrelerinin hangi değerde olması gerektiğinin analizi Minitab 17.0 paket programı ile yapılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı için optimizasyon analizi yapılmıştır. Optimizasyon analizi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı için ASJT parametreleri Çizelge 5.7 elde edilmiştir.

Çizelge 5.7. Ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri ve talaş kaldırma oranının en yüksek değeri için ASJT parametrelerinin optimum değerleri tablosu.

Seviye	NÇ (mm)	NİM (mm/dak)	AAO (g/dak)	TD (dev/dak)	NYM (mm)
Düşük	0,7	5	50	500	2
Orta	---	25	200	1500	10
Yüksek	1,3	45	350	2500	18
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, (Ra) µm için Optimum Değerler	0,7	5	350	2500	2
Talaş Kaldırma Oranı (TKO) için Optimum Değerler, mm ³ /dak	1,3	5	350	2500	18

Çizelge 5.7'de ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri için düşük nozul ilerleme hızı, yüksek aşındırıcı akış oranı, yüksek torna devir hızı, düşük nozul yaklaşma mesafesi ve nozul çapı değerinde olması gerektiği tespit edilmiştir. Talaş kaldırma oranının yüksek olması için ise düşük nozul ilerleme hızı, yüksek aşındırıcı akış oranı, yüksek torna devir sayısı, yüksek nozul yaklaşma mesafesi ve büyük nozul çapı değerinde kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Önerilen bu parametre değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. SONUÇLAR

Geleneksel olmayan imalat yöntemlerin olan Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ) ve Aşındırıcılı Su Jeti ile Tornalama (ASJT) soğuk işleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır. ASJ ve ASJT ile işleme, iş parçası üzerinde herhangi bir ısı etki oluşturmadan işleme yapılabilmesi nedeniyle yüksek mukavemetli, korozyon dirençli mühendislik malzemeleri ile kırılğan malzemeler rahatlıkla işlenebilmektedir.

ASJ işleme yöntemi geleneksel işleme yöntemlerine kıyasla birçok avantaj bulunmaktadır. Bunlar; mikro işleme yapılabilmesi, karmaşık geometrili iş parçalarının işlenebilmesi, işleme esnasında işleme bölgesinde ısı etki oluşturmaması, iş parçası üzerinde çapak oluşturmaması, toz, kimyasal sızıntı yada gaz gibi istenilmeyen zararlı atıkların oluşmaması.

Literatürdeki ve uygulamadaki bulgulardan yola çıkılarak yapılan bu çalışmada, ASJT ile işleme yapabilmek için ASJ tezgâhı çalışma şartlarına uygun özel tornalama düzeneği geliştirilmiştir.

Tasarlanan ve imalatı gerçekleştirilen deney düzeneğinde iki farklı nozul çapı ile işleme parametreleri olarak, üç farklı nozul ilerleme miktarı, aşındırıcı akış oranı, nozul yaklaşma mesafesi ve torna devri kullanılarak AISI 1050 çeliğinin tornalama işlemi sonrasında işleme parametrelerinin iş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkileri değerlendirilmiştir.

Bu araştırmadan elde edilen en önemli bulgular aşağıda özetlenmiştir:

Geliştirilen torna deney düzeneği, suya ve aşındırıcıya karşı korumalı yapılmıştır. Geliştirilen torna deney düzeneğinde, iş parçaları rahatlıkla sökölüp takılabılın mistir.

ASJT' da işleme parametreleri, bir birine uzak değerler ile üç seviyeli tam faktöriyel deney tasarımı ve analizi ile gerçekleştirilmiştir.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde % 10'dan daha büyük etkiye sahip ana etkiler sıralandığında % 41 ile nozul ilerleme miktarı, % 20 aşındırıcı akış oranı ve % 14 ile torna devri olmuştur.

Pareto analiz grafiği üzerinde 0,05 anlamlılık düzeyinde eşik değeri 1,98'dir. Eşik değerini tüm parametreler geçmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü miktarını en çok etkileyen parametre nozul ilerleme miktarı olmuştur.

Ortalama yüzey pürüzlülüğünün en düşük değeri için düşük nozul ilerleme değeri, yüksek aşındırıcı akış oranı, yüksek torna devir hızı, düşük nozul yaklaşma mesafesi ve düşük nozul çapı değerinde olması gerektiği tespit edilmiştir.

Talaş kaldırma oranının yüksek olması için ise düşük nozul ilerleme değeri, yüksek aşındırıcı akış oranı, yüksek torna devir sayısı, yüksek nozul yaklaşma mesafesi ve büyük nozul çapı değerinde kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Önerilen bu parametre değerleri işleme kalitesi ve maliyet açısından büyük önem arz etmektedir.

Nozul ilerleme miktarı 5 mm/dak'dan 45 mm/dak'ya % 800 arttırılmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinde % 88 artış tespit edilmiştir.

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için yapılan doğrusal regresyon analizinden elde edilen matematik model deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve matematik modelin tahminlerinin yeteri kadar güvenli olduğu tespit edilmiştir ($R^2 = 90$).

Yapılan anova analizinde aşındırıcı akış oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi % 20 olmuştur. Aşındırıcı akış oranının 50 g/dak'dan 350 g/dak değerine arttırılınca (% 600) ortalama yüzey pürüzlülük değeri % 42 düşüş gösterdiği tespit edildi.

Aşındırıcı akış oranının artması ortalama yüzey pürüzlülük değerini azaltmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerinin düşük olması yüzey kalitesinin iyi olması anlamına gelmektedir.

AISI 1050 çeliğinin ASJT ile işlenmesinde % 14 ile üçüncü en etkili parametre torna devri olmuştur. Torna devrinin artması ortalama pürüzlülük değerini azaltmıştır. Bu çalışma kapsamında en düşük ortalama yüzey pürüzlülük değeri için torna devri değeri 2500 dev/dak olmuştur. Literatürde, 2500 dev/dak değerinde ASJ ile tornalama işlemine rastlanılmamıştır.

AISI 1050 çeliğinin ASJT ile işlenmesinde, işleme parametrelerinin talaş kaldırma oranı üzerinde % 83 etki ile nozul ilerleme miktarı olmuştur. Nozul ilerleme miktarının artması talaş kaldırma oranını azaltmıştır. Yüksek talaş kaldırma oranı için mümkün mertebe düşük nozul ilerleme miktarı olması gerekmektedir. Nozul ilerleme miktarının 45 mm/dak'dan 5 mm/dak değerine (% 88) düşürülmesiyle talaş kaldırma oranı % 66 artmıştır. Nozul ilerleme miktarının düşük olması durumda birim yüzeye etkiyen aşındırıcı jetin etkisi artmakta ve birim zamanda kaldırılan talaş miktarı da artmaktadır.

Aşındırıcı akış oranının talaş kaldırma oranına etkisi % 14 olarak elde edilmiştir.

ASJT ile işlenen AISI 1050 çeliği numunelerinde yapılan mikro sertlik analizlerinde, en yüksek değer aşındırıcı akış oranının en çok kullanıldığı deneylerde elde edilmiştir. 350 g/dak aşındırıcı akış oranında işlenen deney numunelerinden alınan mikro sertlik ölçümleri, ham malzeme mikro sertliğine göre % 5 artış göstermiştir. Aşındırıcı akış oranı 50 g/dak kullanıldığında mikro sertlik değerinde % 1 oranında artış görülmüştür.

En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,7 mm nozul çapı, 5 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 350 g/dak aşındırıcı akış oranı, 2 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2500 dev/dak torna devrinde (1 µm) elde edilmiştir.

En yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü, 1,3 mm nozul çapı, 45 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 50 g/dak aşındırıcı akış oranı, 18 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 500 dev/dak torna devrinde (3,92 μm) elde edilmiştir.

En çok talaş kaldırma oranı 1,3 mm nozul çapı, 5 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 350 g/dak aşındırıcı akış oranı, 18 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 2500 dev/dak torna devrinde (64,80 mm^3/dak) elde edilmiştir.

En az talaş kaldırma oranı 0,7 mm nozul çapı, 45 mm/dak nozul ilerleme miktarı, 50 g/dak aşındırıcı akış oranı, 2 mm nozul yaklaşma mesafesi ve 500 dev/dak torna devrinde (4,51 mm^3/dak) elde edilmiştir.

Nozul yaklaşma mesafesine bağlı olarak iş parçası bitmiş yüzeyinde radius ve pah oluşumları tespit edilmiştir. Oluşan pah ve radiusler nozul yaklaşma mesafesinin artışına bağlı olarak artış göstermiştir.

Aşındırıcılı su jeti ile tornalamada aşındırıcı su jeti akış yönü ile iş parçası dönüş yönü aynı yönde olması gerektiği, zıt yönlü harekette iş parçası yüzeyi çok pürüzlü olduğu tespit edilmiştir.

6.2. ÖNERİLER

ASJT ile işlemede en düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü 1 μm değerinde elde edilmiştir. Bu nedenle 1 μm değerinden daha düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü elde edilmesi durumunda ek işleme gerek duyulabilir.

Bu çalışma kapsamında pompa basıncı parametre olarak kullanılamamıştır. Pompa basıncının etkisi araştırılabilir.

ASJT işleminde iş parçası çap değeri Ø 30 mm den daha küçük değerlerde ve 240 mm boyundan daha uzun seçilerek ASJ ile tornalanabilirliği araştırılabilir.

Magnezyum esaslı alaşımlar ve kompozit malzemeler işlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Momber, A. W., Kovacevic, R., Momber, A. W. and Kovacevic, R., "Principles of abrasive water jet machining", *London: Springer*, 3-540 (1998).
2. Weller, E. J., "Nontraditional machining processes. Society of Manufacturing Engineers", *Publications/Marketing Division*, (1984).
3. Jain, V. K., "Advanced machining processes", *Allied Publishers*, (2009).
4. Cogun, C., "Computer-aided system for selection of nontraditional machining operations" *Computers in industry*, 169-179 (1993):
5. Kovacevic, R., "Surface texture in abrasive waterjet cutting", *Journal of Manufacturing systems*, 32-40 (1991).
6. Öjmertz, K. M. C., "A study on abrasive waterjet milling. Ph.D thesis", *Chalmers University of Technology*, Sweden, (1997)
7. Fowler, G., "Abrasive water-jet-controlled depth milling of titanium alloys, Ph.D. Thesis", *University of Nottingham*, United Kingdom (2003).
8. Chung, Y., "Development of Prediction Technique for the Geometry of the Abrasive Water Jet Generated Kerf, Ph. D. Thesis", *New Jersey Institute of Technology*, US (1992).
9. Wang, J., Wong, W.C.K., "A study of abrasive waterjet cutting of metallic coated sheet steels", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39 (6): 855-870 (1999).
10. Paul, S., Hoogstrate, A. M., Luttermelt Van, C. A. and Kals, H. J. J., "An experimental investigation of rectangular pocket milling with abrasive water jet", *Journal of Materials Processing Technology*, 73 (1-3): 179-188 (1998)
11. Azmir, M. A. and Ahsan, A. K., "Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 198 (1-3):122-128 (2008).
12. Orbanić, H., Junkar M., Bajsić I., Lebar, A., "An instrument for measuring abrasive water jet diameter", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11): 843-849 (2009).

13. Paul, S, Hoogstrate, A. M., Luttervelt, V., Kals, H. J. J., “Energy partitioning in elasto-plastic impact by sharp abrasive particles in the abrasive water jet machining of brittle materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 200-205 (1998).
14. Nanduri, M., Taggart, D. G., Kim, T. J., “The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 615-623 (2002).
15. Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., Ahmed M., “Effect of minimum quantity lubrication on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 299-304 (2006).
16. Dittrich, M., Dix, M., Kuhl, M., Palumbo, B., Tagliaferri, F., “Process Analysis of Water Abrasive Fine Jet Structuring of Ceramic Surfaces via Design of Experiment”, *Procedia CIRP*, 442-447 (2014).
17. Aich, U., Banerjee, S. and Bandyopadhyay, A., “Probal Kumar Das, Abrasive Water Jet Cutting of Borosilicate Glass”, *Procedia Materials Science*, 775-785 (2014).
18. Wang, J., “Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 306-316 (2007).
19. Kong, M. C., Axinte, D., Voice, W., “Aspects of material removal mechanism in plain waterjet milling on gamma titanium aluminide”, *Journal of Materials Processing Technology*, 573-584 (2010).
20. Zarepour, H., Yeo, S.H., “Single abrasive particle impingements as a benchmark to determine material removal modes in micro ultrasonic machining”, *Wear*, 1-8 (2012).
21. Müller, F., Monaghan, J., “Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1351-1366 (2000).
22. Momber, A. W., “Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high-speed waterjet: an impact-force study”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 31-41 (2001).
23. İnternet: What is the Water Jet Machine, “Waterjet Technolog”. <http://www.chinawaterjets.com/waterjet-technolog-shwo134.html> (2015).
24. İnternet: Aquablast, “products Jet Edge”, http://www.aquablast.co.uk/products_jet_edge.asp (2015).
25. İnternet: Maxièm, “There’s More to MAXIEM’s Value than its Good Price”, <http://www.maxiemwaterjets.com/blog/> (2015).

26. İnternet: Accustream, “Global Waterjet Cutting Machines Industry”, <https://www.accustream.com/products/waterjetmachines/aseries/a-series-2.html> (2015).
27. İnternet: Swa, “Industrial Waterjet”, <http://www.swa.se/page/132/industrial-waterjet.aspx> (2015).
28. Nanduri, M., Taggart, D. G., Kim T. J., “The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (5): 615-623 (2002).
29. Keyurkumar, J. P. L., “Quantitative evaluation of abrasive contamination in ductile material during abrasive water jet machining and minimising with a nozzle head oscillation technique”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (10): 1125-1132 (2004).
30. Srinivasu, D. S., Babu, R. N., “A neuro-genetic stand-off for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting considering variation in diameter of focusing nozzle”, *Applied Soft Computing*, 8 (1):809-819 (2008).
31. Momber, A. W., “The kinetic energy of wear particles generated by abrasive–water-jet erosion”, *Journal of Materials Processing Technology*, 121-126 (1998).
32. İnternet: Abrasive-Regulator, “Maximize Cutting Performance”, <https://www.accustream.com/products/abrasive-regulator.html> (2015).
33. Babu, M. K. and Krishnaiah, C., “A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining”, *Wear*, 763-773 (2003).
34. Babu, M. K. and Krishnaiah, C., “Studies on recharging of abrasives in abrasive water jet machining”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 697-703 (2002).
35. Dong, Y., Liu, W., Zhang, H., Zhang, H., “On-line Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cleaning”, *Procedia CIRP*, 278-282 (2014).
36. Narayanan, C., Balz, R., Weiss, D.A., Heiniger K. C., “Modelling of abrasive particle energy in water jet machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2201-2210 (2013).
37. Coşansu, G., “Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kolemanit tozunun aşındırıcı olarak kullanılmasının deneysel incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 94 (2010).
38. Ansorge, A., “Fluid jet principles and applications”, *Carbide and Tool Journal*, 16-20 (1985).

39. Ohman, J. L., "Abrasives: Their characteristics and effect on waterjet cutting", *Proceedings of the 7th American Waterjet Conference*, USA, 351-362 (1993).
40. Vasek, J., Martinec, P., Foldyna, J., Hlavac, L., "Influence of properties of garnet on cutting process", *Proceedings of the 7th American Waterjet Conference*, USA, 375-388 (1993).
41. Fowler, G., Pashby, I.R., Shipway, P.H., "The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V", *Wear*, 613-620 (2009).
42. Jackson, M. J. and Davim J. P., "Machining with abrasives", *Springer* (2010).
43. Benedict, G. F., "Nontraditional manufacturing processes", *CRC Press*, 19 (1987).
44. Rajurkar, K. P., "Nontraditional manufacturing processes", *Handbook of Design, Manufacturing and Automation*, 211-241 (1994).
45. Axinte, D.A., Srinivasu, D.S., Kong M.C., Butler-Smith, P.W., "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 797-803 (2009).
46. Loveless, T. R., Williams, R. E. and Rajurkar, K. P., "A study of the effects of abrasive-flow finishing on various machined surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*, 133-151 (1994).
47. Nguyen, T., Shanmugam, D. K. and Wang, J., "Effect of liquid properties on the stability of an abrasive waterjet", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1138-1147 (2008).
48. Rhoades, L. J., "Abrasive jet stream polishing", *U.S. Patent No. 5*, 964:644. 12 (1999).
49. Liu, Y. W., "Improving the abrasion resistance of hydraulic-concrete containing surface crack by adding silica fume", *Construction and Building Materials*, 972-977 (2007).
50. Internet: Overview of Waterjets, "About Super-Water", www.waterjets.org (2015).
51. Ramulu, M., "Machining and surface integrity of fibre-reinforced plastic composites", *Sadhana*, 449-472 (1997).
52. Chizari, M., Barrett, L. M. and Al-Hassani, S. T. S., "An explicit numerical modelling of the water jet tube forming", *Computational Materials Science*, 378-384 (2009).

53. DeSilva, A. K. M. and McGeough J. A., “Computer applications in unconventional machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 276-282 (2000).
54. Kechagias, J., Petropoulos, G. and Vaxevanidis, N., “Application of Taguchi design for quality characterization of abrasive water jet machining of TRIP sheet steels”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 635-643 (2012).
55. Komanduri, R., “Machining of fiber-reinforced composites”, *Machining Science and Technology*, 1.1: 113-152 (1997).
56. French, P. W., Naeem, M., Clowes, J. and Sharp, M. C., “Fibre laser material processing of Aerospace Composites”, *Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*, (2009).
57. Rajesh, N. and Babu N. R., “Multidroplet impact model for prediction of residual stresses in water jet peening of materials”, *Materials and manufacturing processes*, 399-409 (2006).
58. Zeng, J. and Kim T. J., “An erosion model for abrasive waterjet milling of polycrystalline ceramics”, *Wear*, 275-282 (1996).
59. Miller, D. S., “Micromachining with abrasive waterjets” *Journal of Materials Processing Technology*, 37-42 (2004).
60. Hashish, M. and Whalen, J., “Precision drilling of ceramic-coated components with abrasive-waterjets”, *Journal of engineering for gas turbines and power*, 148-154 (1993).
61. Mackerle, J., “Finite element analysis and simulation of machining: an addendum-a bibliography (1996–2002)”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 103-114 (2003).
62. Kulekci, M. K., “Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1297-1306 (2002).
63. El-Hofy, H., “Advanced machining processes: nontraditional and hybrid machining processes”, *McGraw Hill Professional*, (2005).
64. Lemma, E., Chen, L., Siores, E. and Wang, J., “Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation”, *Composite structures*, 297-303 (2002).
65. Zeng, J. and Thomas, J. K., “Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials”, *Jet cutting technology*, Springer Netherlands, 483-501 (1992).

66. Wang, J. and D. M. G., "A predictive depth of penetration model for abrasive waterjet cutting of polymer matrix composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 390-394 (2002).
67. Chen, L., Siores E. and Wong, W. C. K., "Optimising abrasive waterjet cutting of ceramic materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 251-254 (1998).
68. Siores, E., Wong, W. C. K., Chen, L. and Wager, J. G., "Enhancing abrasive waterjet cutting of ceramics by head oscillation techniques", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 327-330 (1996).
69. Hascalik, A., Çaydaş, U. and Gürün H., "Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy", *Materials & design*, 1953-1957 (2007).
70. Shanmugam, D. K. and Masood, S. H., "An investigation on kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of layered composites", *Journal of materials processing technology*, 3887-3893 (2009).
71. Pandey, P. C. and Shan, H. S., "Modern machining processes", *Tata McGraw-Hill Education*, (1980).
72. Müller, F. and Monaghan, J., "Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1351-1366 (2000).
73. WANG, Z. L., HU, S. G., and YAO, W. L. "Experimental research of ultra-high pressure abrasive waterjet cutting rock in submerged environment", *Journal of Hydrodynamics*, (Ser. A) 2: 007(2009).
74. Shanmugam, D. K., Wang, J. and Liu, H., "Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1527-1534 (2008).
75. Ohlsson, L., Powell, J., Ivarson, A. and Magnusson, C., "Comparison between abrasive water jet cutting and laser cutting", *Journal of Laser Applications*, 46-50 (1991).
76. Liu, H-T., "Waterjet technology for machining fine features pertaining to micromachining", *Journal of Manufacturing Processes*, 8-18 (2010).
77. Zeng, J. and Thomas, J. K., "Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials", *Jet cutting technology*, Springer Netherlands, 483-501 (1992).
78. Ho-Cheng, H., "A failure analysis of water jet drilling in composite laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 423-429 (1990).

79. El-Domiaty, A. A. and Abdel-Rahman, A. A., "Fracture mechanics-based model of abrasive waterjet cutting for brittle materials", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 172-181 (1997).
80. Brandon, J. W., Ramsey, B., Macfarlane, J. W. and Dearman, D., "Abrasive water-jet and diamond wire-cutting technologies used in the removal of marine structures", *Offshore Technology Conference*, (2000).
81. Ansari, AI. and Hashish, M., "On the modeling of abrasive Waterjet turning", *In: Proceedings of 11th international conference on jet cutting technology*, Scotland, 555-6 (1992).
82. Hashish, M., "Turning with abrasive waterjets—a first investigation", *ASME J Eng Ind*, 281-90 (1987).
83. Zhong, Z. W. and Han, Z. Z., "Turning of glass with abrasive waterjet", *Materials and Manufacturing Processes*, 339-349 (2002).
84. Andersson, U., Holmqvist, G., Öjmertz, K.M.C., "Abrasive Waterjet Used As A Tool for Producing Materials Test Specimens", *2003 WJTA American Waterjet Conference*, Houston, Texas (2003).
85. Uhlmann, E., Flögel, K., Kretschmar, M., Faltin F., "Abrasive Waterjet Turning of High Performance Materials", *Procedia CIRP*, 409-413 (2012).
86. Axinte, D. A., Stepanian, J. P., Kong, M. C. and McGourlay, J., "Abrasive waterjet turning-An efficient method to profile and dress grinding wheels", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 351-356 (2009).
87. Manu, R., N., Babu, R., "An erosion-based model for abrasive waterjet turning of ductile materials", *Wear*, 1091-1097 (2009).
88. Zohoor, M. and Zohourkari, I., "Modeling of Abrasive Waterjet Turning", *Journal of Applied Sciences Research*, 7. 8 (2011).
89. Kartal, F. ve Gökkaya, H., "Aşındırıcı Su Jeti İle Tornalama Deney Düzenegi Tasarımı", *International Iron and Steel Symposium*, Karabük, Türkiye (2012).
90. Kartal, F., Gökkaya, H. and Nalbant, M., "Turning of (Cu-Cr-Zr) Alloy With Abrasive Water Jet", *21 st International Conference on Water Jetting*, Ottawa, Canada, 281-288, 19-22 September (2012).
91. Kartal, F., Cetin, M. H., Gökkaya, H., Yerlikaya, Z., "Optimization of Abrasive Water Jet Turning Parameters for Machining of Low Density Polyethylene Material Based on Experimental Design Method", *International Polymer Processing*, 535-544 (2014).

92. Kartal, F. ve Gökkaya, H., “AISI 1040 Çeliğinin Aşındırıcı Su Jeti ile Tornalama İşleminde İşleme Parametrelerinin Talaş Kaldırma Hacmine ve Kesme Derinliğine Etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20-24 (2014).
93. Hloch, S., Hlaváček, J., Vasilko, K., Cárach, J., Samardžić, I., Kozak, D. and Klichová, D.,”Abrasive waterjet (AWJ) titanium tangential turning evaluation” *Metalurgija*, 53.4: 537-540 (2014).
94. Li, W., Zhu, H., Wang, J., Yasser, M. A., “Chuanzhen Huang, “An investigation into the radial-mode abrasive waterjet turning process on high tensile steels”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 365-376 (2013).
95. Zohourkari, I., Zohoor, M. and Annoni, M., “Investigation of the Effects of Machining Parameters on Material Removal Rate in Abrasive Waterjet Turning”, *Advances in Mechanical Engineering*, (2014).
96. Kartal, F. ve Gökkaya, H., “Effect of Abrasive Water Jet Turning Parameters on Depth of Cut of AISI 1050 Steel”, *22nd International Conference on Water Jetting, Haarlem*, Netherlands, 3-5 (2014).
97. Karakurt, I. and Aydin, G., “A Machinability Study of Granite Using abrasive Waterjet Cutting Technology”, *Gazi University Journal of Science*, 143-151 (2011).
98. Ghosh, D., Das P. K., Doloi, B., “Parametric Studies on Abrasive Water Jet Cutting of Silicon Nitride Materials”, *5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference*, India (2014).
99. Selvan, M. C. and Kumar, K. S., “Influence of Process Parameters on Surface Roughness in Abrasive Waterjetcutting of Titanium”, *Global Journal of Advanced Engineering Technologies*, 3 (1) 2014
100. Reddy, D. S., Kumar, A. S. and Rao, M. S., “Parametric Optimization of Abrasive Water Jet Machining of Inconel 800H Using Taguchi Methodology”, *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 158-162 (2014).
101. Nagdeve, L., Chaturvedi, V. and Vimal, J.,”Implementation of Taguchi Stand-off for Optimization of Abrasive Water Jet Machining Process Parameters”, *International Journal of Instrumentation, Control and Automation*, 9-13 (2012)
102. Wang, J., “Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites–cutting performance, erosive process and predictive models.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15.10 757-768 (1999).
103. Azmir, M. A. and Ahsan, A. K., “Investigation on glass/epoxy composite surfaces machined by abrasive water jet machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 122-128 (2008).

104. Kartal, F., Gökkaya, H., Yerlikaya, Z. and Polat, R., “The Influence of Different Cutting Methods on Tensile Testing of Aluminium 6061-T6 Specimens”, *22nd International Conference on Water Jetting*, Haarlem, Netherlands, 75 (83): 3-5 September (2014).
105. Katz, F. J., “Abrasive Materials”, *Mineral Resources of the United States*, 213-232 (1917).
106. Clarke, R. G., “Abrasive materials. US Department of the Interior”, *Bureau of Mines*, (1976).
107. Internet: Technical Library, “Technical Library (PDFs)”, <http://www.barton.com/blast-abrasives/technical-library-pdfs> (2014).
108. İnternet: AISI 1050 steel, “AISI 1050 steel”, http://www.matweb.com/search/datasheet_text.aspx?matguid=eeebf996f8684ca5ae67ac7efe147f64, (2014).
109. İnternet: “kmtslv50”, <http://www.kmtwaterjet.com/KMT%20Streamline%20SL-V%20Pumps%20Catalog.pdf> (2015).
110. Mathews, P. G., “Design of Experiments with MINITAB”, *ASQ Quality Press* (2005).
111. İnternet: “Minitab 17 Statistical Software” [Computer software]. State College, PA: Minitab, Inc., www.minitab.com (2010).
112. Mitutoyo SJ-301 Surface Roughness Tester, User’s Manual (2014).
113. İnternet: “Carl Zeiss Ultra Plus Fesem”, http://www.zeiss.com/microscopy/en_us/products/electron-microscopy/ultra-materials.html (2014).
114. İnternet: “MH-130 Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı”, <http://www.bursamndt.com.tr/mh-130-mikro-sertlik-olcum-cihazı-s383.html> (2014).
115. İnternet: “Some Thoughts On Laminar Flow”, <http://theeconomyofmediaracleofottaw.blogspot.com.tr/2013/04/some-thoughts-on-laminar-flow.html> (2014).
116. İnternet: Wardjet, “Waterjet Cutting Characteristics”. <http://www.wardjet.com/01-waterjet-cutting-haracteristics> (2014).
117. Kubik, A. and Kleiser, L., “Multiphase jet flow in abrasive water jet cutting”. *Proc. Appl. Math. Mech.*, 9 (2009).
118. Liu, H., Wang, J., Kelson, N. and Brown, R. J., “A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 488-493 (2004).

119. Osman, A. H., Mabrouki, T., They, B. and Buisine, D., “Experimental analysis of high-speed air–water jet flow in an abrasive water jet mixing tube”, *Flow Measurement and Instrumentation*, 37-48 (2004).
120. Chen, C., Nie, S., Wu, Z. and Li, Z., “A Study of High Pressure Waterjet Characteristics by CFD Simulation”, *Machine Tool & Hydraulics*, 2: 037 (2006).
121. Momber, A. W. and Kovacevic, R., “An energy balance of high-speed abrasive water jet erosion”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 463-472 (1999).
122. Wang, J., “Particle velocity models for ultra-high pressure abrasive waterjets”, *Journal of Materials Processing Technology*, 4573-4577 (2009).
123. Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M. and Tsuji, Y., “Multiphase flows with droplets and particles”, *CRC press*, (2011).
124. Liu, H., Wang, J., Brown, R. J. and Kelson, N., “Computational fluid dynamics (CFD) simulation of ultrahigh velocity abrasive waterjet”, *Key Engineering Materials*, 477-482 (2003).
125. Md Aminul, I., Zoheir, F. and Jonathon, B., “High Pressure Water-Jet Technology for the Surface Treatment of Al-Si Alloys and Repercussion on Tribological Properties”, *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, (2011).
126. Hashimoto, T., Osawa, Y., Itoh, S., Mochizuki, M. and Nishimoto, K., “Long-term stability of residual stress improvement by water jet peening considering working processes”, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 135.3: 031601 (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Fuat KARTAL, 1981 yılında Konya'nın Ereğli ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Konya Ereğli'de tamamladı. 2002 yılında Kocaeli Üniversitesinde başladığı Lisans eğitimini 2006 yılında tamamladı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi fen bilimleri enstitüsünde makine eğitimi anabilim dalında yüksek lisansa başladı ve Haziran 2009'da mezun oldu. 2008 yılından beri Kastamonu Üniversitesi Kastamonu Meslek Yüksekokulu makine ve metal teknolojileri bölümünde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.