

Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede
Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının
Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi

Tamer Saraçyakupoğlu

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Aralık 2012

Analysis of Material, Pressure,
Cutting Velocity and Water Jet Diameter's Effect
On The Surface Quality For The Water Jet Cutting

Tamer Saraçyakupoğlu

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Mechanical Engineering

December 2012

Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede
Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının
Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi

Tamer Saraçyakupoğlu

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Enerji Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Aralık 2012

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Tamer SARAÇYAKUPOĞLU'nun DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Yaşar PANCAR

İkinci Danışman:-

Üye: Prof. Dr. Yaşar PANCAR

Üye: Prof. Dr. Mustafa CAVCAR

Üye: Prof. Dr. Remzi GÜRLER

Üye: Yrd. Doç. Dr. İrfan ÜREYEN

Üye: Yrd. Doç. Dr. H. Sevil ERGÜR

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Teknolojide imalat yöntemleri alışılmış ve alışılmış olmayan olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Alışılmış imalat yöntemlerinde kesici takımlar kullanılmakta olup söz konusu takımlar ve işlenecek malzeme arasındaki izafi hareket ya düzlemsel ya da dairesel olduğundan, elde edilen parçaların yüzeyleri de genellikle düzlemsel ya da daireseldir. Ayrıca, çok küçük veya çok büyük parçaların imalatında geleneksel talaşlı imalat yöntemleri sınırlı kaldığından geleneksel olmayan imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel olmayan yani diğer bir anlamda modern imalat teknolojilerinden kabul edilen su jetiyle kesme işlemleri 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. 1980'li yıllarda ise su jetine aşındırıcı tanecik katılması suretiyle aşındırıcılı su jeti imalat yöntemi uygulamaya geçmiştir. Teknolojide oldukça geniş bir kullanım alanı olan aşındırıcılı su jeti ile yapılan kesme işlemleri sonrasında yüzey kalitesinin istenilen seviyede olması malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapına bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada iki farklı malzeme türü üzerinde basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapının değiştirildiği deneyler icra edilmiş ve yüzey kalitesi incelenerek bir analiz yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İmalat Yöntemleri, Aşındırıcı Su Jeti, Yüzey Kalitesi, Malzeme Türü, Basınç, İlerleme Hızı, Su Jeti Çapı.

SUMMARY

Manufacturing methods are divided into two groups as traditional and non-traditional manufacturing methods. Cutters are being used in traditional manufacturing method and since the relative movement between base metal and cutter is either linear or circular, the machined product's surface is generally either linear or circular. Also it is known that traditional manufacturing methods are limited for quite big or small parts therefore non-traditional manufacturing methods were required. One of the non-traditional Method in another word "Modern Method" is Water Jet Cutting's usage was being started in 1970's. Abrasive Water Jet Cutting which has abrasive particules in water jet was being used in 1980's. It is considered that the handling of desired surface quality after cutting with Water Jet Cutting Process which has a wide usage area in technology depends on material type, pressure, cutting velocity and water jet diameter. Because of that reason some experiments and analysis study accomplished with two different type of materials, changing pressure, cutting velocity and water jet diameter.

Keywords: Manufacturing Methods, Abrasive Water Jet, Surface Quality, Material Type, Pressure, Cutting Velocity, Diameter of Water Jet Nozzle.

TEŞEKKÜR

Öncelikle beni hayata getiren anne ve babama, yaptığım her çalışmada bana destek olan eşime, cansuyum olan biricik oğluma çok teşekkür ederim.

Osmangazi Üniversitesi'nde lisansüstü eğitime ilk başladığım dönemlerden itibaren sadece Makine Mühendisliği dalında değil, her türlü davranışında öğrencilerine “Kaliteli İnsan” olma adına örnek olan, yurt dışında ve yurt içindeyken yaptığım çalışmalarda yol göstericiliğinden her zaman fayda gördüğüm danışman hocam Sayın Prof.Dr. Yaşar PANCAR'a teşekkürlerimi arz ederim.

Master ve doktora çalışmamda benden desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç.Dr. İrfan ÜREYEN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin hazırlanmasında kaynak önerileriyle bana ışık tutan sayın Yrd. Doç. Dr. Hayriye Sevil ERGÜR hanımefendiye teşekkür ederim.

Deneyler ve yüzey analiz çalışmalarımı Türk Silahlı Kuvvetleri (T.S.K.) adına yurt dışı görevimi ifa ederken gerçekleştirdim. Bu bağlamda, 01 Şubat 1992 yılında Şırnak'ta Şehit olan ağabeyim P.Komd.Ütğm. Alaattin SARAÇYAKUPOĞLU'nun da mensubu bulunduğu T.S.K.'ya bana verdiği hizmet fırsatları ve imkânlar için sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAŞTIRMA KONUSU.....	4
3. SU JETİ İLE KESME İŞLEMİ.....	5
3.1. Su Jeti İşleminin Tanımı.....	5
3.2. Su Jeti İşleminin Çalışma Prensibi.....	6
3.3. Su Jeti İle Kesme İşleminin Tarihsel Gelişimi.....	7
3.4. Su Jeti.....	10
3.4.1. Su Jeti ile Kesme Çeşitleri.....	11
3.4.1.1. Su Jeti Makinesinin Elemanları.....	11
3.4.1.2. Su Jeti Kullanım Sahaları.....	12
3.4.1.3. Su Jetinin Faydaları.....	13
3.4.1.4. Su Jetinin Mahsurları.....	14
3.4.2. Aşındırıcılı Su Jeti	15
3.4.2.1. Aşındırıcılı Su Jeti Makinesinin Elemanları.....	16
3.4.2.2. Aşındırıcılı Su Jetinde Kullanılan Aşındırıcı Tanecikler.....	17
3.4.2.2.1. Aşındırıcı Tanecik Çeşitleri ve Seçim	
Kriterleri.....	18
3.4.2.2.2. Aşındırıcı Taneciklerin Su Jetine	
Katılmasında Jet Pompa Etkisi.....	20

İÇİNDEKİLER (devam)

3.4.3. Aşındırıcı Su Jetinin Faydaları.....	22
3.4.4. Aşındırıcı Su Jetinin Mahsurları.....	23
3.4.5. Su Jetinde Kullanılan Basınç Artırıcıların Tasarım Kriterleri.....	24
3.4.6. Su Jeti ve Aşındırıcı Su Jeti İle Teknolojide Uygulama Örnekleri.....	24
3.4.7. Aşındırıcı Su Jetinin Diğer Kesim Yöntemleri ile Mukayesesi.....	27
4. AŞINDIRICI SU JETİ ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEORİK ANALİZİ....	29
4.1. ASJ'de Enerji Korunumun Tanımı.....	31
4.1.1. ASJ ile Malzeme Kesiminde Enerji Aktarımı.....	33
4.1.2. Hızı Artırılmış Su Jetinde Tanecik Hareketinin İncelenmesi.....	37
4.1.2.1. Sünek Malzemelerde Aşındırma İşleminin Tanımı.....	37
4.1.2.2. Kırılgan Malzemelerde Aşındırma İşleminin Tanımı.....	40
4.1.3. İvmelenmiş Tanecikte Enerji Aktarımının Tanımı.....	42
4.1.4. Yüksek Hızlı Su Jetinde Enerji Aktarımı.....	45
4.1.5. Kartıştırma Haznesindeki ve Su Jetindeki Akış.....	46
4.1.6. Kesme Anında Yüzeyde Oluşan Çarpma Etkisinin İncelenmesi.....	50
4.1.6.1. Aşındırıcı Su Jetinde Kesme Jet Dağılımının İncelenmesi	50
4.1.6.2. Su Jetinin Performansının İncelenmesi.....	53
4.1.6.2.1. Kesme Derinliğinin İncelenmesi.....	54
4.1.6.2.2. Kesme İşleminde Kritik ve Optimum İlerleme...	58
4.1.6.2.3. Kesme Hassasiyetinin Belirlenmesi.....	59
4.1.6.2.4. Kesme Verimi ve Optimum Kesme Şartlarının Belirlenmesi.....	60

İÇİNDEKİLER (devam)

5. YÜZEY KALİTESİ.....	62
5.1. Yüzey Kalitesinin Anlatımı ve Belirlenme Parametreleri.....	63
5.1.1. Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (Ra).....	63
5.1.2. Maksimum Profil Yüksekliği (Ry, Rt).....	64
5.1.3. On Nokta Pürüzlülüğü (Rz).....	65
5.2. Yüzey Kalitesinin Üçgen ile İfadesi.....	65
6. YAPILAN DENEYLER.....	68
6.1. Deneyde ASJ ile Kesilen Malzemeler.....	68
6.1.1. BS 7191 355 EMZ ÇELİĞİ.....	69
6.1.1.1. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Kullanım Yerleri	69
6.1.1.2. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Fiziksel Özellikleri.....	70
6.1.1.3. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Elemental Dağılımı.....	70
6.1.2. ASTM A516 Gr.60 ÇELİĞİ.....	71
6.1.2.1. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Kullanım Yerleri.....	71
6.1.2.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Fiziksel Özellikleri.....	72
6.1.2.3. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Elemental Dağılımı.....	73
6.2. Deneyin Yapılışı.....	73
6.2.1. Güney Kore’de Kesme Deneyinin Yapıldığı Fabrikanın Tanıtımı....	76
6.2.2. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Hazırlanması.....	77
6.2.3. Kesme Sonrası Yüzey Analizleri.....	77
6.2.3.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği ile Kesim İşlemi.....	78
6.2.3.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği ile Kesim İşlemi.....	80
6.3. Kesilen Malzemelerin Yüzey Kalitesi Analizleri.....	82
6.3.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği Yüzey Kalitesi Analizi.....	83
6.3.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Yüzey Kalitesi Analizi.....	90

İÇİNDEKİLER (devam)

7. MATERYAL VE METOT.....	96
7.1. Giriş.....	96
7.2. Yöntem.....	96
7.3. Malzeme Türünün Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi.....	98
7.4. Basıncın Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Analizi.....	98
7.5. Kesme Hızının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Analizi.....	99
7.6. Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Analizi.....	99
7.7. Malzeme Türü, Basınç, Kesme Hızı ve Su Jeti Çapı Değişimleri ile Yüzey Kalitesi En Yüksek Kesimin Belirlenmesi.....	101
8. SONUÇLAR.....	102
8.1. Malzeme Türüne Bağlı Olarak Yüzey Kalitesi Değerlendirmesi.....	102
8.2. İki Çelik Malzemenin Yüzey Kalitesinin Kıyaslanması.....	114
9. ÖNERİLER.....	136
10. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	137
11. EKLER.....	140

ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan bal peteği malzemenin işlenmesi..... 7
Şekil 3.2.	Su Jeti Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi..... 8
Şekil 3.3	SJ Kesme Sisteminin Şematik Görünümü..... 11
Şekil 3.4.	ASJ ile kesmede kullanılan kesme kafası..... 15
Şekil 3.5.	Aşındırıcılı Su Jeti Makinesinin Elemanları..... 16
Şekil 3.6.	Garnetin Görünüşü..... 17
Şekil 3.7.	Farklı Şekillerdeki Aşındırıcı Çeşitleri..... 19
Şekil 3.8.	Jet Pompası Şematik Gösterimi..... 20
Şekil 3.9.	ASJ Sisteminin Şematik Gösterimi..... 21
Şekil 3.10.	Aşındırıcının Suya Karışımı Sistematiğinin Gösterimi..... 22
Şekil 3.11.	3 Boyutlu Makine Parçası Kesimi..... 25
Şekil 3.12.	ASJ ile Cam Kesimi..... 27
Sekil 4.1.	Katı Tanecik Aşınmasıyla Malzeme Aşındırma Sistemleri..... 29
Şekil 4.2.	Sünek Bir Malzeme Üzerinde Bir α Hücüm Açısı ile İki Boyutlu Aşındırıcı Kesim İşlemi ve Kesme Geometrisinin Gösterimi..... 37
Şekil 4.3.	Kesme Sırasındaki Temas Kuvvetlerinin Şematik Gösterimi..... 38
Şekil 4.4.	Yuvarlanarak Sürtünme ve Kesme Deformasyonun Şematik Gösterimi..... 40
Şekil 4.5.	Kırılgan Malzemede Meydana Gelen Kopmanın Şematik Gösterimi..... 41
Şekil 4.6.	ASJ Sisteminde Yüksek Hızlı Karışım Oluşumunun Şematik Gösterimi..... 42
Şekil 4.7.	Su Jetindeki Karıştırma haznesindeki Tanecik Hareketi..... 48
Şekil 4.8.	İdeal Kesme Şekli ve Yüzeyin Görünüşü..... 54
Şekil 4.9.	Gerçekte Karşılaşılan Kesme Şekli ve Yüzey Görünüşü..... 55
Şekil 4.10.	Kesme Çiziklerinin Oluşumu..... 56
Şekil 4.11.	Yüzey Kalitesinin Tasniflenmesi..... 59
Şekil 5.1.	Pürüzlülük Analizi Grafiği..... 63
Şekil 5.2.	Matematiksel Ortalama Pürüzlülük Grafiği..... 64

Şekil 5.3.	Maksimum Profil Yüksekliği Grafiği (Ry, Rt).....	65
Şekil 5.4.	On Nokta Yüksekliği Grafiği (Rz).....	65
Şekil 6.1.	Güney Kore’de Deney Sırasında Malzeme Kesimi.....	76
Şekil 6.2.	Güney Kore’de Malzeme Kesimi Sonrası İnceleme.....	77
Şekil 6.3.	d=1 mm, P=3300 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	78
Şekil 6.4.	d=1 mm, P=3400 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	78
Şekil 6.5.	d=1 mm, P=3500 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	79
Şekil 6.6.	d=1,5 mm, P=3300 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	79
Şekil 6.7.	d=1,5 mm, P=3400 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	79
Şekil 6.8.	d=1,5 mm, P=3500 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	80
Şekil 6.9.	d=1 mm, P=3300 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	80
Şekil 6.10.	d=1 mm, P=3400 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	81
Şekil 6.11.	d=1 mm, P=3500 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	81
Şekil 6.12.	d=1,5 mm, P=3300 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	81
Şekil 6.13.	d=1,5 mm, P=3400 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	82
Şekil 6.14.	d=1,5 mm, P=3500 Bar Basınçta İlerleme Değişimine Bağlı Yüzey Kalitesini Gösteren Makro Fotoğraf.....	82
Şekil 6.15.	d=1 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	83
Şekil 6.16.	d=1 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	84
Şekil 6.17.	d=1 mm, P=3400 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	84
Şekil 6.18.	d=1 mm, P=3400 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	85

Şekil 6.19.	d=1 mm, P=3500 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	85
Şekil 6.20.	d=1 mm, P=3500 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	86
Şekil 6.21.	d=1,5 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	86
Şekil 6.22.	d=1,5 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	87
Şekil 6.23.	d=1,5 mm, P=3400 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	87
Şekil 6.24.	d=1,5 mm, P=3400 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	88
Şekil 6.25.	d=1,5 mm, P=3500 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	88
Şekil 6.26.	d=1,5 mm, P=3500 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analizi Grafiği.....	89
Şekil 6.27.	d=1 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	90
Şekil 6.28.	d=1 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	90
Şekil 6.29.	d=1 mm, P=3400 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	91
Şekil 6.30.	d=1 mm, P=3400 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	91
Şekil 6.31.	d=1 mm, P=3500 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	92
Şekil 6.32.	d=1 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	92
Şekil 6.33.	d=1,5 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	93
Şekil 6.34.	d=1,5 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	93
Şekil 6.35.	d=1,5 mm, P=3400 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	94
Şekil 6.36.	d=1,5 mm, P=3400 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	94
Şekil 6.37.	d=1,5 mm, P=3500 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	95
Şekil 6.38.	d=1,5 mm, P=3500 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği.....	95
Şekil 7.1.	Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (Ra) Değerinin Gösterilmesi...	104
Şekil 8.1.	BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Basınca Bağlı Olarak, Yüzey Kalitesi, İlerleme Hızı ve Çap Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi	106
Şekil 8.2.	BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi.....	107
Şekil 8.3.	BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi.....	108
Şekil 8.4.	ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Basınca Bağlı Olarak,	

	Yüzey Kalitesi, İlerleme Hızı ve Çap Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi	112
Şekil 8.5.	ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi.....	113
Şekil 8.6.	ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi.....	114
Şekil 8.7.	BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemelerinin Yüzey Kalitesinin 3 Boyutlu Grafikle Kıyaslanması.....	119
A1	ASJ Tezgahında Kesim İşlemi (Güney Kore, 2009).....	140
A2	ASJ Tezgahında Kesim İşlemi (Güney Kore, 2009).....	140
B1	ASJ İle 3,75 cm Kalınlığında Titanyum Malzeme Kesim.....	141
B2	B2 ASJ İle Granit Malzeme Kesimi.....	141
C1	ASJ İle Elde Edilen Bir Bisiklet.....	142
C2	ASJ İle Elde Edilen Parçalar.....	142
D1	SJ ile Et Kesimi.....	143
D2	SJ ile Şekillendirilmiş Gıda Ürünleri.....	143
E1	ASJ İle Elde Edilen Hassas Parçalar.....	144
E2	ASJ İle Elde Edilen Hassas Parçalar.....	144
F1	ASJ ile Inconel Malzeme Kesimi.....	145
F1	ASJ ile Bakır Malzeme Kesimi.....	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Aşındırıcı Su Jetinin Tarihçesi.....	10
3.2. Aşındırıcı Malzemelerin Sertlikleri.....	19
5.1. Dört Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi.....	66
5.2. Üç Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi.....	66
5.3. İki Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi.....	66
5.4. Bir Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi.....	67
5.5. Üçgensiz Yüzey Pürüzlülük İfadesi.....	67
6.1. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Fiziksel Özellikleri.....	70
6.2. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Elemental Dağılımı.....	70
6.3. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Fiziksel Özellikleri.....	72
6.4. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Elemental Dağılımı.....	73
6.5. Kesim İşlem Basamakları ve Değişen Parametreler.....	73
8.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemenin Yüzey Hassasiyet Değerleri.....	102
8.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemenin Yüzey Hassasiyet Değerleri.....	108
8.3. BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Malzemelerin Yüzey Hassasiyetlerinin Kıyaslanması.....	115

SİMGELER VE KISALTMALAR

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A_0	: Kesme Önyüzündeki Toplam Alan (m^2)
$A(h)$: Birim Alana Düşen Çarpışma Sayısı (Adet/ m^2)
b_c	: Radyal ve Eksenel Yöndeki Parçacık Temas Eni (mm)
b_m	: Radyal ve Eksenel Yöndeki Parçacık Temas Eni (mm)
C	: Ampirik Parametre
C_0	: Kütleli Debi Tanım Sayısı (1/kg)
C_{d0}	: Orifis Debi Katsayısı
C_f	: Sürtünme ve Hız Katsayısı
D_M	: Ortalama Tane Boyutu (mm)
d_n	: Nozul Çapı (mm)
d_{pin}	: Nozul Girişindeki Parçacık Çapı (mm)
d_{pex}	: Nozul Çıkışındaki Parçacık Çapı (mm)
d_F	: Odaklama Tüpü ve Efektif Jet Çapı (mm)
d_w	: Nozul Çapı (mm)
E	: Elastisite (Young) Modülü (Nm)
E_A	: Jetin Malzemeye Çarpma Anındaki Kinetik Enerjisi (Nm)
E_{ex}	: Suyun Nozul Çıkışındaki Kinetik Enerjisi (Nm)
E_{FR}	: Malzemenin Kopması ve Kesilmesi İçin Gerekli Olan Enerji (Nm)
E_p	: Aşındırıcı Parçacıkların Ortalama Kinetik Enerjisi (Nm)
E_{pc}	: Ezilen Parçacıkların Kinetik Enerjisi (Nm)
E_S	: Yüksek Hızlı Su Jetinin Süspansiyon Enerjisi (Nm)
E_{SP}	: Yüksek Hız Jetindeki Parçacıklarının Enerjisi (Nm)
E_{STR}	: Çarpma Anında Oluşan Gerilme Dalgaları Tarafından Yutulan Enerji (Nm)
E_W	: Su Jetinin İvmelenme Enerjisi (Nm)

E_{harcanan}	: İşleme Anında (Aşınma, Sürtünme vb.) Harcanan Enerji (Nm)
f	: Hedef Malzemenin Akış Stresi
F_w	: Aşındırıcı Su Jeti Kuvveti (N)
F_s	: Yüksek Hızlı Süspansiyon Oluşumunda Parçacık Kuvveti (N)
f_e	: Elastik Çarpışmada Parçacık Sürtünme Katsayısı
H_M	: Malzeme Sertliği (R_c)
h	: Gerçek Kesme Derinliği (mm)
$h_{\text{max.}}$: Ulaşılabilecek Maksimum Kesme Derinliği (mm)
K	: Düşey ve Yatey Eksendeki Direnç Kuvvetlerinin Oranı
K'	: Akış Katsayısı
k_1	: Hedef Ve Parçacık Malzeme Özelliklerine Bağlı Katsayı
m_a, m_A	: Çarpışan Aşındırıcıların Toplam Kütlesi İle Aşındırıcı Su Jetinin Kütlesi (kg)
m_p	: Tek bir aşındırıcı tanecik kütlesi (kg)
\dot{m}_a	: Su Jetine Katılan Parçacıkların Toplam Kütlesel Debisi (kg/s)
\dot{m}_A, \dot{m}	: Aşındırıcı Su Jetinin Kütlesel Debisi (kg/s)
\dot{m}_w	: Suyun kütlesel debisi (kg/s)
\dot{m}_p	: Aşındırıcı parçacığın kütlesel debisi (kg/s)
P_1	: Nozul Giriş Basıncı (m/sn)
P_2	: Nozul Çıkış Basıncı (m/sn)
$P_{\text{eşik}}$: Su Jeti Eşik Basıncı (N/m^2)
P_{thr}	: Su Jeti Eşik Basıncı (N/m^2)
P_L	: Borudaki Basınç Kaybı (N/m^2)
P_m	: Radyal ve Eksenel Yöndeki Basınç Dağılımı (N/m^2)
P_{ort}	: Jet Ana Bölgesindeki Ortalama dinamik Basınç (N/m^2)
P_w	: Su Jeti Basıncı (N/m^2)
\dot{Q}_w	: Sade Su Jetinin Hacimsel Debisi (m^3/sn)
R	: Parçacık Büyüklüğü (mm)
R_a	: Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (Á)

R_y, R_t	: Maksimum Profil Yüksekliği (Á)
R_z	: On Nokta Pürüzlülüğü (Á)
S	: Aşınma Profil Parametresi
t	: Tepki Süresi (sn)
u	: Aşındırıcı Su Jeti İlerleme Hızı (m/sn)
v, V	: Hız (m/sn)
V_1	: Nozulda Akıntıyla Ters Yönlü Hız (m/sn)
V_2	: Akışla Aynı Yönlü Hız (m/sn)
V_c	: Kritik Tanecik Hızı (m/sn)
V_{FR}	: Aşındırılan Sünek Malzeme Miktarı (kg)
V_M	: Her Bir Katı Parçacığın Aşındırdığı Hacim (m ³)
v_M	: Malzeme Aşınma Hızı (m/sn)
V_N	: Nozul Orifisindeki Hız (m/sn)
V_{PL}	: Plastik Deformasyonla Aşındırılan Malzeme Miktarı (kg)
V_S	: Emme Girişinde Hız (m/sn)
V_T	: Difüzör Boğazında Hız (m/sn)
\dot{V}, \dot{V}_w	: Aşındırıcı Su Jetinin Hacimsel Debisi (m ³ /s)
w	: Ana Bölgedeki Jet Eni (mm)
X, X_c	: Eksenel Yöndeki Standof Mesafesi (mm)
X_{limit}	: Standof Mesafesinin Sınır Değeri (mm)
α	: Hücüm açısı (derece)
\mathcal{E}_c	: Kesme Aşınması İçin Gerekli Özgül Enerji (m ² / s ²)
\mathcal{E}_d	: Deformasyon Aşınması İçin Gerekli Özgül Enerji (m ² / s ²)
χ	: Su Jetinin İvmelenme Katsayısı
ϕ	: ≈2 Enerji Kayıp Katsayısı ve Parçalanma Sayısı
γ_M	: Malzeme Aşınması İçin Gerekli Özgül Enerji (m ² / s ²)
φ	: Kesme Miktarı (Boyutsuz)
η	: Hız Sönümlenme Katsayısı
η_c	: Kesme Verimi

η_T	: Karışım Odası veya Giriş Tüpündeki Sürtünmelerden Meydana Gelen Momentum Değişim Katsayısı
κ_A	: Jetteki Havanın İvmelenmesiyle Oluşan Enerji Kayıp Katsayısı
κ_P	: Parçacık Çarpışmasıyla Oluşan Enerji Kayıp Katsayısı
κ_{PC}	: Parçacık Ezilmesiyle Oluşan Enerji Kayıp Katsayısı
κ_{PW}	: Parçacık Cidar Etkisiyle Oluşan Enerji Kayıp Katsayısı
κ_S	: Yüksek Hızlı Süspansiyon Oluşumunda Enerji Kayıp Katsayısı
κ_T	: Türbülans Etkisiyle Oluşan Enerji Kayıp Katsayısı
λ_1, λ	: Çarpım Katsayıları
v_A	: Su Jetine Katılan Aşındırıcı Parçacıkların Toplam Hızı (m/s)
v_w	: Ortalama Su Hızı (m/s)
v_S	: Yüksek Hızlı Süspansiyon Oluşumunda Parçacık Hızı (m/s)
v_0	: Nozul Çıkışındaki Jet Hızı ve (m/s)
\bar{v}_p	: Tek Bir Aşındırıcı Parçacığın Özgül Hacmi (1/m ³)
v_p	: Tek bir Aşındırıcı Parçacık Hızı (m/s)
v_w	: Besleme Hattındaki Su Hızı (m/dk)
w_i	: Nozul Girişindeki Parçacık Eni (mm)
w_e	: Nozul Çıkışındaki Parçacık Eni (mm)
ρ_M	: Aşındırılan Malzeme Yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_W	: Su Jetine Katılan Suyun Yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_a	: Su Jetine Katılan Aşındırıcı Parçacıkların Yoğunluğu (kg/m ³)
P_{thr}	: Su Jeti Eşik Basıncı (Nm ²)
ρ_M	: Aşındırılan Malzeme Yoğunluğu (kg/m ³)
ρ_a	: Su jetine katılan Aşındırıcı Parçacığın Yoğunluğu (kg/m ³)
σ_{vp}	: Özgül Parçacık Hacmine Ait Yüzey Gerilmesi (N/m ²)
σ_y	: Malzeme Kopma Gerilmesi (N/m ²)

ψ	: Plastik Deformasyon Katsayısı
Ψ	: ≈ 2 (Dikey Kuvvetin Yatay Kuvvete Oranı)
ζ_c	: Geometrik Şekil Katsayısı

Kısaltmalar

SJ	Sade Su Jeti
ASJ	Aşındırıcı Su Jeti
EDM	Elektro Discharge Machine (Erozyon Tezgahı)
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
vb	ve benzerleri

Birimler

	<u>Acıklama</u>
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
μm	Mikron (0,001 mm)
Å	Angstron (0,00000001 mm)
Bar	Bar
MPa	Megapascal
dak	Dakika
s	Saniye

1. GİRİŞ

Sanayileşmenin en belirgin özelliği yeni teknoloji üretebilmek ve üretilen yeni teknolojinin günlük hayatta kullanılmasının yolunu açmaktır.

Takım tezgahları, döküm, dövme, ısıl işlemler, boya, kaplama vb. üretime yönelik teknolojiler sayesinde, ham malzemeden, yarı mamule ve yarı mamulden kullanıma hazır mamule kadar geçen sürecin her aşamasında teknolojik gelişim devam etmektedir. Üretilen yeni teknolojilerle birlikte insanın ortaya koyduğu akıl ve bedensel işgücünün üretkenliği artmıştır.

Yakın geçmişteki dönem içerisinde Sade Su Jeti (SJ) ve Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ) endüstride temizleme, kesme ve delik açma işlemlerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuşlardır (Khan, 1989).

SJ kullanımı 1970'lerin başında yüksek hızlı su jetlerinin kullanımı ile başlamıştır. Yumuşak malzemelerin kesiminde ideal bir çözüm olmalarına rağmen metal ve seramik gibi malzemelerin kesimlerinde daha az başarılı olmuşlardır. Pahalı ve gürültülü bir işlem olan SJ zaman içerisinde içine aşındırıcı tanecikler ilave edilmesi suretiyle çok verimli bir kesim metodu olarak karşımıza çıkmıştır.

ASJ ile kesme, giderek yaygınlaşan bir şekilde birçok uygulama alanına sahip olan bir modern kesme metodudur. ASJ ile tanışma 1980'li yılların başında gerçekleşmiştir. Lal taşından elde edilen garnet adı verilen taneciklerin su içerisine katılmasıyla beraber ASJ, metal malzemeler, plastik, cam, seramik vb. gibi geniş yelpazedeki birçok malzemenin kesiminde kullanılmaktadır. ASJ, yüzeyde ısıl gerilmelere yol açmaması, freze, torna gibi tezgahlarda söz konusu olan kesici uçların yıpranmaması ve kısa zamanda kesme işlemi gerçekleştirmesinden dolayı geleneksel kesme işlemlerinin yerini almıştır (Bao, 2004).

Metal, cam ve kompozit malzemelerin işlenmesinde garnet en çok kullanılan aşındırıcı taneciktir. Daha sert olan alüminyum oksit ve silikon karpit gibi malzemeler bazen seramik işlemede kullanılırlar. Aşındırıcı tanecikler karıştırma haznesi içerisindeki su jeti tarafından ivmelendirilirler. Aşındırıcı tanecik ve su jeti karışımının lüleden çıkış hızı ise orifisteki suyun akış hızının yaklaşık % 80'i mertebesindedir. Jet, partikülleri işlenecek olan malzemenin yüzeyine yüksek hızla çarptırır ve sonuçta yüzeyden malzeme kopmaları meydana gelir. Kesici kafanın hareketi çoğu zaman nümerik kontrollü tezgahlar tarafından gerçekleştirildiği için karmaşık şekilli malzemelerin işlenmesi de söz konusu olmaktadır. SJ ile kesmede kalıplama maliyeti bulunmamaktadır.

Alışılmış imalat yöntemleri kesici takımlara verilen hareketlerin sınırlı olması nedeniyle birkaç ayrıcalık dışında düz yüzey veya silindirik yüzeylerle sınırlıdır. Buna örnek olarak, deliklerin alışılmamış yöntemlerle işlenmesi veya açılması çok kolay olmasına karşın, dairesel olmayan (Örneğin: Kare delik) delinmesi çok zordur. Bu sınırlama birçok durumda tasarım değişiklikleri ile çözülmeye çalışılsa da her zaman için önemli bir sınırlama olmaktadır. Buna karşın dairesel olmayan deliklerin alışılmamış imalat yöntemleri ile delinmesi veya açılması dairesel delikler kadar kolay ve basit bir işlemdir. Benzer şekilde alışılmış yöntemlerle ulaşılamayan alanların işlenmesi, çok küçük boyutlu hacimlerin işlenmesi, çok küçük boyutlu deliklerin delinmesi alışılmamış imalat yöntemleri için kolay ve basit uygulamalar olmaktadır (Erden, 2002).

ASJ, makinelerinde kullanılan en kritik makine elemanlarından bir tanesi nozuldur. Nozullar, içlerinden geçen taneciklerin yıpratma etkisi nedeniyle zaman içinde genişleyebilirler. Oldukça pahalı olan nozulların büyük çoğunluğu Ingersol-Rand, Flow and Boride Corporation (ABD) şirketi tarafından üretilmektedir (Ju Bao, 2004).

ASJ ile kesmede ilk ve tek kesimde istenilen yüzey hassasiyeti çoğu zaman mümkün olmakta ancak malzeme türü, basınç, kesme hızı ve nozuldan çıkan su jeti

çapına bağlı olarak bazen istenmeyen ve striation (dalgalanma) adı verilen çiziklerle karşılaşmaktadır. Operasyondan sonra bitirme işlemleri yapılması gerekebilmektedir.

Tezin birinci bölümünde giriş, ikinci bölümde araştırma konusu hakkında genel bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde ise, SJ ve ASJ ile ilgili genel tanımlamalar, her iki sisteme ait makine elemanlarının tanıtımı, her iki sistemin yarar ve mahsurları, ASJ'de kullanılan aşındırıcı taneciklerin seçim kriterleri, her iki sistemde kullanılan basınç artırıcıların tasarım kriterleri ve her iki su jeti ile kesim sisteminin teknolojiye kullanım yerlerine ilişkin bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde SJ ile kesme işleminin Bernoulli Denklemi temelinden yola çıkarak teorik analizi, malzeme kesimi sırasında meydana gelen enerji aktarımı, su jeti performansının derinlik, optimum ilerleme hızı, hassasiyet ve kesme verimi açısından incelenmesi ve nihayetinde optimum kesme şartlarının belirlenmesi konuları ele alınmıştır. Beşinci bölümde, yüzey kalitesinin anlatımı ve belirlenme parametreleri açıklaması yapılarak, pürüzlülük ölçüm ve gösterim yöntemleri konularında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde, deneyde kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri, elemental dağılımları, kesim işlemi hazırlıkları ve kesme sonrası yüzey analizleri ile yüzey kalitesi analizlerine yönelik bilgi verilmiştir.

Buna ilave olarak yine altıncı bölümde kesim sonrası malzemelerin makro fotoğrafları ve yüzey kalitesi analiz grafikleri sunulmuştur. Yedinci bölüm olan materyal ve metot kısmında malzeme türü, basınç, kesme hızı ve su jeti çapının yüzey kalitesine etkisi ele alınmıştır. Sekizinci bölümdeki sonuçlar kısmında malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve nozul çapı değişiklikleri yapılarak karşılaştırılmış ve yüzey kalitesinin analizi gerçekleştirilmiştir.

Dokuzuncu bölümde önerilerde bulunulmuştur. Bu önerilerin ileride bahse konu çelik malzemelerle yapılacak çalışmalara ışık tutacağı değerlendirilmektedir.

2. ARAŞTIRMA KONUSU

SJ ve ASJ ile kesme, plazma ve laser ile kesme yöntemlerinin de aralarında bulunduğu modern kesim tekniklerinin içerisinde yer alan önemli bir kesim işlemidir. SJ ve ASJ kaliteli kesimler yapılabilen bir “soğuk” kesme işlemidir. Bu proses aynı zamanda “hidrodinamik makineleme” olarak da adlandırılmaktadır.

ASJ, SJ'nin içerisine aşındırıcı tanecikler ilave edilmesi suretiyle elde edilen bir kesme yöntemidir. Tanecik ilavesi kesici su jetindeki kesme etkisini artırmaktadır. (Alper Kuni, 2008).

“ASJ ile kesmede malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapının yüzey kalitesine etkisinin analizi” konulu çalışmada; SJ ve ASJ kesme işlemlerinin, teknolojiye kullanım sahaları, makine elemanlarının tanıtımı, yarar ve mahsurları, mühendislik yaklaşımı içerisinde sistem çalışma performansları gibi konular hakkında detaylı bilgiler verilmiş; kesim işlemleri sırasında meydana gelen enerji aktarımının teorik anlatımı yapılarak, su jetinin ilerleme hızı, hassasiyet ve kesme verimi açısından incelenmesi gerçekleştirilmiş; deneyde kullanılan çelik malzemelerin teknolojiye kullanım yerleri, fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiş; yüzey hassasiyetinin ölçülmesi ve belirlenmesine yönelik yapılan çalışmaların teorik temelleri anlatılmış; Güney Kore'nin Changwon Şehri'nde bulunan Changwon Water Jet Co.Ltd. tesislerinde BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemelerle basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapı değiştirilerek toplam 180 adet kesme deneyleri gerçekleştirilmiş; Gumi City'de kurulu olan Kumoh National Institute of Technology'deki malzeme ve metalurji laboratuvarında kesilen malzemelerin üzerinde makro fotoğraf çekimleri ve yüzey kalitesi analiz grafikleri elde edilmiş; fotoğraf ve analiz grafiklerinin ışığında basıncın, kesme hızının ve su jeti çapının kesilen parçadaki yüzey kalitesine etkisi incelenmiş ve sonuçta daha sonraki yıllarda su jeti ile kaliteli yüzeyi elde etmek amacıyla yapılacak deneyler ve sanayide gerçekleştirilen kesme işlemlerine ışık tutması amacıyla basınç, kesme hızı ve su jeti çapının kesme yüzey kalitesine etkisi analiz edilerek önerilerde bulunulmuştur.

3. SU JETİ İLE KESME İŞLEMİ

SJ ile kesme metodu, çok geniş yelpazede malzeme kesme kabiliyeti olarak bilinmektedir. Bu sebeple oldukça rağbet görmektedir. Aşırı sert malzemeler haricindeki tüm malzemelerin bütün kalınlıklarda ve bütün şekillerde kesebilmesi SJ ile kesme işlemini cazip kılmaktadır. Bu kesme işleminin en dikkat çeken özelliği, ısıdan etkilenen bir kesme bölgesi bırakmayan “hassas soğuk kesme” işlemi olmasıdır. Yüksek nitelikli bir kesme işlemi olarak SJ uygulamalarının pek çok uygulaması bulunmaktadır. SJ, bütün uygulamalar için düşünülse de markalama ile işlem, lazer ya da plazma kesme gibi alışılmış kesme metodlarının yerini alacağı beklenmemektedir. Bu kesme yönteminin, pahalı malzemelerin geniş yelpazedeki kesme işlemleri için gittikçe artan bir şekilde deneyim kazanmaya devam edeceği düşünülmektedir.

3.1. Su Jeti İşleminin Tanımı

ASJ, hemen hemen bütün malzemelerin kesim işlemlerinde kullanılabilen yüksek hızdaki uygun bir su jeti ve aşındırıcı tanecik kullanılan bir kesme işlemidir. 2700-4000 Bar basınçtaki su, safir, yakut ya da elmas bir orifisten geçer. Bu akış, akış tarafından oluşturulan ve aşındırıcı taneciklerin emildiği bir vakum haznesinden yüksek hızla hareket eder. Lüleden çıkış anında su akışının momentumu aşındırıcı tanecikleri ivmelendirir ve beraberinde taşır. İçinde aşındırıcı malzeme taşıyan bu su jeti çapı 0.5-1.5 mm. arasındaki çapa sahip olarak su ve aşındırıcı malzemeden oluşan bir 3 fazlı akışkan olarak nozulu terk eder. Yüksek hıza ulaşmış aşındırıcı tanecikler malzemenin yüzeyine çarparak kesme işlemini tamamlarlar. Kesime uğrayan malzeme üzerinde etkiler oluşup mikro parça kopmaları meydana gelir. Aşındırıcı taneciğin miktarı kesilecek malzeme tipiyle bağlantılı olarak, kesici jetin boyutuna bağlıdır. Lal taşı şu ana kadar en çok bilinen aşındırıcı malzemedir. Lal taşı çevresel olarak temiz, silica barındırmayan ve sarf malzemeler üzerinde makul bir seviyede aşındırma özelliğine sahip olan bir taştır. Diğer nadir kullanılan aşındırıcılar, kum, olivine (Magnezyum kumu), silis kumu, curuf türü malzemelerdir. Alüminyum oksit, yüksek sertlik derecesi nedeniyle çok sert malzemelerin kesimlerinde çok nadiren kullanılır. Çok sert olması

nedeniyle alüminyum oksit nozulun yıpranmasına neden olduğu için operasyon maliyeti yüksektir. Aşındırıcı malzemeler bir kere kullanılıp kullanım dışı bırakılırlar. Kesmenin ana özellikleri, ısı olmaması, dar kesim yüzeyinin olması, kesim yüzeyinin pürüzsüz olması ve yüksek hassasiyettir. Maliyet etkin olan aşındırıcı kesme uygulamaları bu karakteristiklerle yarar sağlamaktadır (Accustream, Waterjet Cutting White Papers, 2011).

3.2. Su Jeti İşleminin Çalışma Prensipleri

Hidrodinamik makineleme olarak da isimlendirilen SJ, bir elmas, yakut yada safir nozul üzerinden aşırı derecede basınçlandırılmış (UHP - Ultra-High Pressure) su huzmesinin kullanıldığı bir kesim metodudur. Su jeti parça üzerinde hareket eder ve hassas bir çaptaki su jeti sayesinde dar bir kesme alanı elde edilir (Tunç, 2000). Potansiyel bir makineleme olan yüksek basınçlı su jeti sistemi tok malzemelerde dahi istenilen özel şekillerin elde edilmesinde kullanılan bir kesme metodudur.

Birçok geleneksel kesme metodundaki ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) sorunu ve lazer ile plazma-ark kesme sistemindeki malzeme bozulmalarının olmaması sebebiyle su jeti ile kesim tercih edilen bir işlemdir. Kesme kafasının kesilecek olan malzemeye temas etmemesi sebebiyle SJ ile kesme oldukça yüksek manevraya sahiptir ve hassas dik açılarda kolay kesim yapabilmektedir. Jetin çapının çok küçük olması sebebiyle SJ ile küçük delikler açılabilir ve dar gedikler elde edilebilir.



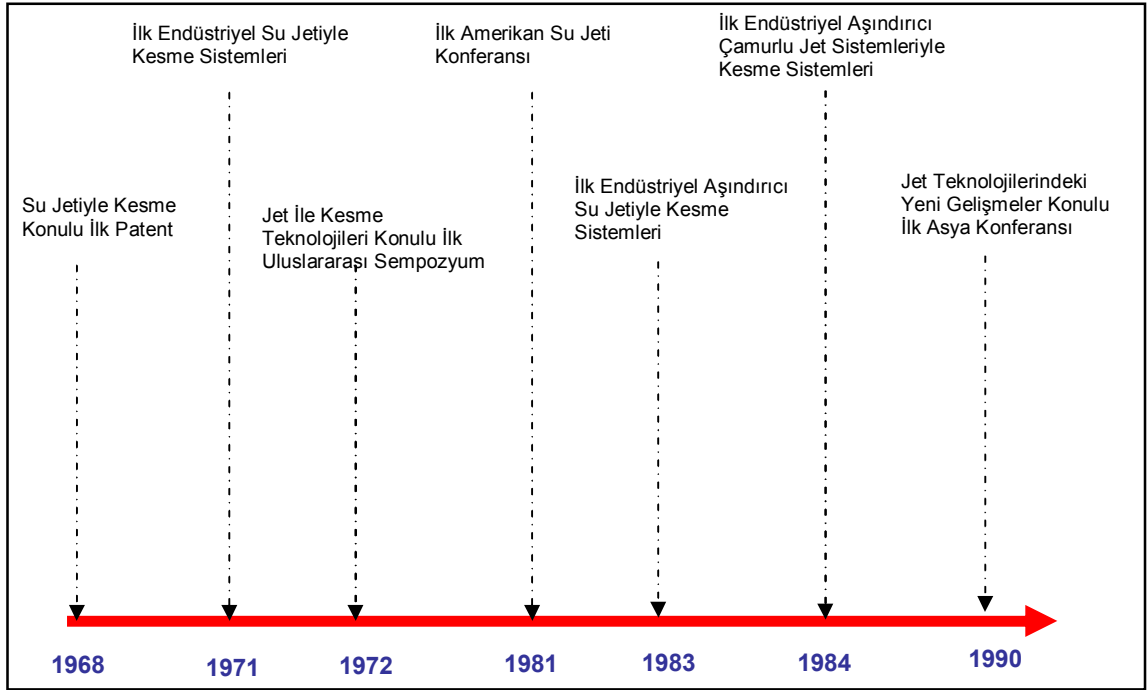
Şekil 3.1. Havacılık ve uzay sanayiinde kullanılan bal peteği malzemenin işlenmesi(www.waterjets.org, 2011)

3.3. Su Jeti ile Kesme İşleminin Tarihsel Gelişimi

Araştırmacı Prandtl'a ait serbest türbülans teorisine göre dairesel serbest jet konusu oldukça yoğun bir şekilde çalışılmaya başlanmıştır. Araştırmacı Tollmien, Prandtl'ın karıştırma uzunluğu hipotezini, küçük bir orifisten uygulanan aksenal simetrik bir jet probleminin çözümünde ilk defa uygulayan kişi olmuştur. 1932 yılında araştırmacı Taylor serbest türbülansla ilgili olarak bir başka teori geliştirmiştir. 1942 yılında Prandtl, Newton'un viskozite sürtünmesine ilişkin teorisinin temel olarak ele alındığı bir başka teoriyi ortaya koymuştur. Araştırmacı Gortler, bu teoriyi kullanarak kapalı formdaki jet çalışmasını yapmıştır. Araştırmacılar Bakke, Poreh, Cermak, Tan, Komatsu gibi bilim adamları su jetinin değişik formasyonları ile ilgili çalışmalar ortaya koymuşlardır (Stefan Jackna, 1978). Su jeti ile kesme işleminin tarihçesi ise Sovyetler Birliği ve Yeni Zelanda'daki madencilik çalışmalarına kadar gitmektedir. Akarsu akıntılarında elde edilen su, taş madenlerin yüzeylerine püskürtülerek yüzey temizlenmesi sağlanmıştır. Aynı yöntem daha sonra Güney Afrika'daki altın madenlerinde patlatma suretiyle oluşan kaya parçalarının çalışma sahasından bir toplama alanına taşınması için kullanılmıştır. Basınçlı su ilk defa 1853-1886 yılları arasında yumuşak altın taşlarının maden kazım yüzeylerinden çıkarılması amacıyla California Gold Country (ABD) şirketi tarafından kullanılmıştır. Basınçlı su sayesinde yıkanması istenilen maden yüzeyinde yeterli temizlik sağlanmıştır. Bu işlem taşla

patlatılma anında tehlikeden uzak kalınması sebebiyle madenciye daha fazla güvenlik sağlamaktadır. Bu metod 1900'lü yıllar öncesinde Prusya ve Rusya'da patlatılmış kömür taşlarının yıkanması amacıyla da kullanılmıştır.

1930'larda Rusya basınçlandırılmış su jetini kesme amacıyla kullanma denemesinin yapıldığı ilk ülke olmuştur. 1970'lerde, ABD'de, bu teknoloji 4000 barlık basıncın elde edilebildiği bir şekilde geliştirilmiştir. Yüksek basınçla delme işlemlerinin kullanıldığı maden işletmeleri yaygınlaşmıştır.



Şekil 3.2. Su Jeti Teknolojisinin Tarihsel Gelişimi

Profesör Norman Franz, 1972'de Michigan Üniversitesi'nde Mc.Cartney Manufacturing Company (ABD) ile çalışarak ilk endüstriyel su jeti kesim tesisini üretmişlerdir. Anılan kesim düzeni daha sonra ABD'de Alton Boxboard tesislerinde de kullanılmıştır. Daha sonra Flow Industries (ABD) su jeti ile kesme ekipmanlarının pazarlamasına başlamıştır. İlk defa basınçlı suyun içerisinde kum taneciklerinin

kullanılması Flow Industries tarafından metal yüzeyinde parlak bir bitim işlemi yapılması amacıyla yapılmıştır. Bu işlemin sonunda su jetinin metaller ve seramikleri kesebileceği ortaya konmuştur (www.mfg.mtu.edu, 2011).

Araştırmacı Dr. Franz odaklanmış ve hızı artırılmış bir su huzmesi sayesinde aşırı derecede yüksek kesme gücüne sahip uygulamalar elde edilebileceğini iddia etmiştir. Modern jet teknolojisinin, su jeti ile kesmeye ait patentli ilk araştırmanın Michigan Üniversitesi'nde Profesör Norman Franz tarafından yapıldığı bilinmektedir.

ABD'deki Flow Research'de çalışan araştırmacı Dr. Mohamed Hashish, 1979 yılında su jetinin kesme gücünün artırılması ve bu sayede metaller ve diğer sert malzemelerin kesimlerinin gerçekleştirilmesi üzerine araştırmalar yapmıştır. Araştırmacı Dr. Mohamed Hashish, SJ'nin içine aşındırıcı tanecikler eklemek düşüncesini ortaya koyan ve "ASJ'nin babası" olarak bilinen kişidir. Genellikle zımpara kağıtlarında kullanılan lüle taşı tozlarını SJ'ye eklemiştir. 1980'lere gelindiğinde ASJ ilk defa çelik, cam ve beton kesmede kullanılmıştır. 1983 yılında ise otomobil camının kesilmesi amacıyla ilk ASJ makinesi satılmıştır. ASJ teknolojisini, inconel, paslanmaz çelik, titanyum ve o dönemde sadece askeri uçaklarda şimdi ise yolcu uçaklarında da kullanım alanı olan karbon-fiber gibi yüksek dayanımlı hafif malzemelerin kesimleri için mükemmel bir sistem olarak gören havacılık ve uzay sanayii olmuştur. O günden beri iş atölyelerinde, havacılık, taş, kiremit, jet motorları, nükleer ve denizcilik gibi birçok sahada kullanım alanı bulmuştur (www.flowasia.com, 2011).

Çizelge 3.1. Aşındırıcı Su Jetinin Tarihçesi

AŞINDIRICI SU JETİNİN TARİHÇESİ	
TARİH	GELİŞME
1950 ~	Altın madenciliğinde çeşitli deneyler.
1960 ~	700 Bar'da su jeti kullanımı, Exotech Inc. Virginia Terraspace Inc. (ABD) endüstriyel denemeler, O.Imanaka Tokyo (JAPONYA) ağaç kesimi,
1971	Ticari anlamda ilk yüksek basınçlı su pompası.
1971	Endüstriyel uygulama, kağıt boruların kesimi.
1981	Patenti alınmış ilk aşındırıcı su jeti
1990	Patentli aşındırıcılı su jeti ile işlemlerin başlangıcı.
1991	Süspansiyonlu su jeti jetlerinin kullanımı.
1995	Kesme işlemlerinde sıvı azotun kullanımı.
1999	7000 Bar basınçta aşındırıcı su jeti kullanımı.
2000	7000 Bar üstü basınçlarda aşındırıcı su jeti kullanımı.

3.4. Su Jeti

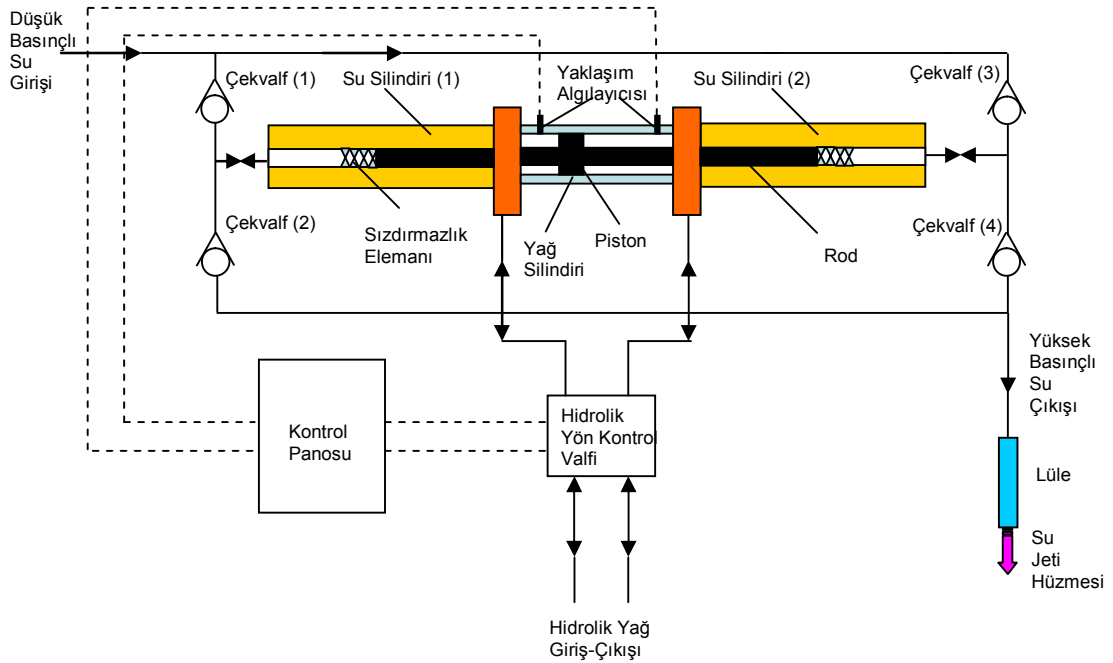
SJ ile kesme ticari anlamda ilk olarak 1970 ortalarında oluklu mukavva kesimi ile endüstriye girmiştir. Genellikle sabit basınç altında işlenebilen sertliği düşük malzemeler ile suyun iletildiği basıncın etkisiyle yapısında mikro düzeyde kırıklar meydana gelebilecek gevrek malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır.

3.4.1. Su Jeti ile Kesme Çeşitleri

SJ kullanılarak kesilebilen malzeme örnekleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

- (1) Yumuşak lastikler / kauçuklar,
- (2) Süngerler,
- (3) Folyo türü çok ince malzemeler,
- (4) Plastik tabanlı halılar,
- (5) Kağıt, mukavva kutu ve benzerleri,
- (6) Yumuşak sızdırmazlık contaları,
- (7) Her türde mum ve
- (8) Yumuşak veya ince ahşap vb. malzemeler.

3.4.1.1. Su Jeti Makinesinin Elemanları



Şekil 3.3. SJ Kesme Sisteminin Şematik Görünümü (Kumar, 2005)

Sistemin çalışma prensibi şöyledir: Bir su pompası yardımıyla basınç artırıcıya gönderilen düşük basınçlı saf su, 1 ve 3 numaralı valflerin üzerinden su silindirlerine ulaşmaya çalışır. Pistonun sağa sola hareketi sırasında su basıncı, 2 numaralı su silindirinde artırılır. Bu durumda 2 ve 3 numaralı valfler yüksek basınçlı su tarafından kapatılır, yüksek basınçlı su 4 numaralı valfin üzerinden nozula ulaşırken düşük basınçlı su 1 nolu valfin üzerinden 1 numaralı su silindirine dolar.

Su basıncı, 1 numaralı su silindirinde artırılırsa 1 ve 4 numaralı valfler yüksek basınçlı su tarafından kapatılır, yüksek basınçlı su 2 numaralı valfin üzerinden nozula ulaşırken düşük basınçlı su 3 numaralı valfin üzerinden 2 numaralı su silindirine dolar (Coşansu, 2010). Sistemde basınç artırma işleminin sürekliliği, yaklaşım algılayıcıları (sensörler) ile son konumu algılanan yağ silindir pistonunun yönünün bir programlanabilir akıllı kontrolörler PLC tarafından kumanda edilen yön denetim valfi ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir (Geren ve Tunç, 2000).

3.4.1.2. Su Jeti Kullanım Sahaları

Kağıt ve mukavva sektöründe su jeti yaygın kullanılan bir yöntemdir. Mekanik sistemlerin kesim sırasında yarattığı hasar su jeti ile kesimde yaşanmaz. Mekanik kesmeler sırasında kesilen bölgedeki malzeme kaybı yaklaşık 0,5 mm olurken su jeti ile bu ölçü 0,1 mm'ye indirilmiştir. Kesim esnasında gözlemlenebilir nem ve toz oluşturmaz, yüksek operasyon hızlarına ulaşılabilir. Tekstil ve giyim sektöründe, geleneksel yollarla kesimi oldukça zor olan kumaş su jetiyle kolaylıkla kesilebilir. Ayrıca sistem daha karmaşık kesimlere de olanak vermektedir. Farklı modeller ve kalıplar arasındaki geçiş bilgisayar kontrollü sistemlerle daha kolay olmakta ve işlem hızı, kesici uç değiştirme gibi bir problem olmadığı için artmaktadır. Kauçuk ve plastik sanayisinde de tercih edilen saf su jeti ile kesme sistemleri, gözenekli, taneli ve düşük sertlikte malzemelerin kesilmesinde kullanılır.

Özellikle kapı ve pencere imalatında kullanılan PVC türü malzemelerin kesilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca, cam takviyeli plastik, kauçuk, plexiglas,

sünger ve makralon gibi plastik ve türevleri olan malzemeler de yüksek hızlarda kesilebilir. Polimer katkılı su jeti sistemleri ayakkabı ve dericilik sektöründe kullanıldığında, malzeme sarfiyatında %15'lik bir düşüş gözlenmiştir. (Coşansu, 2010)

3.4.1.3. Su Jeti Kullanımının Yararları

SJ' nin birçok kullanım alanı mevcuttur ve diğer yöntemlere nazaran SJ' nin tercih edilmesi için birçok gerekçe bulunmaktadır. Aşağıda kısa bir anlatımla su jetinin bazı yararları sıralanmıştır:

- Kesme yüzeylerinde ısı etkilenme olmadığından malzemenin metalürjik özellikleri değişmemektedir.

- Kağıt, kumaş, mukavva, deri vb. malzemelerde kesme bölgesinde ihmal edilebilecek kadar ıslanma görülür.

- Kesme herhangi bir noktadan başlayabilir. Karmaşık kesimler elde edilebilir.

- Kesme genişliği dar, su jeti ve malzeme arasındaki yanıl açıklık minimum seviyededir.

- Kesme sırasında çapak oluşmaz. Tozsuz ve keskin kesme detayı verir. Dolayısıyla kesimden sonra herhangi bir son işleme gerek kalmaz.

- Standart CAD/CAM sistemleriyle programlanabilir. Bir tezgâh operatörü tarafından kesilecek malzemelerin boyutları kontrol ünitesine programlanabilir ve parçanın tam olarak programlandığı gibi kesimi yapılabilir. Bu işlem bir parçanın detaylı teknik resminin çizilerek akabinde imalat sürecine alınmasından çok daha etkindir.

- Basit sabitleyicilerle kesim yapılır. Tezgâh ayar zamanı çok kısadır.

- Kesici değiştirme, bileme gibi işlemler gerektirmez.
- SJ ile kesim yönteminde kesim ağzı çok kcktr ve çok az malzeme israf olur.
- Kesici olarak kullanılan su ucuz, bol ve zehirli olmayan yapıdadır.
- SJ çok kısa zamanda verimli bir şekilde prototip imalatı için kullanılabilir. SJ, retim için çok kolay bir şekilde otomatize edilebilir (www.mfg.mtu.edu, 2011).

3.4.1.4. Su Jetinin Mahsurları

SJ diğer kesme metodlarının önüne geçen oldukça faydalı bir yöntemdir ancak bununla beraber SJ’ de bir takım sınırlamalar mevcuttur. Aşağıda bunlara örnekler verilecektir:

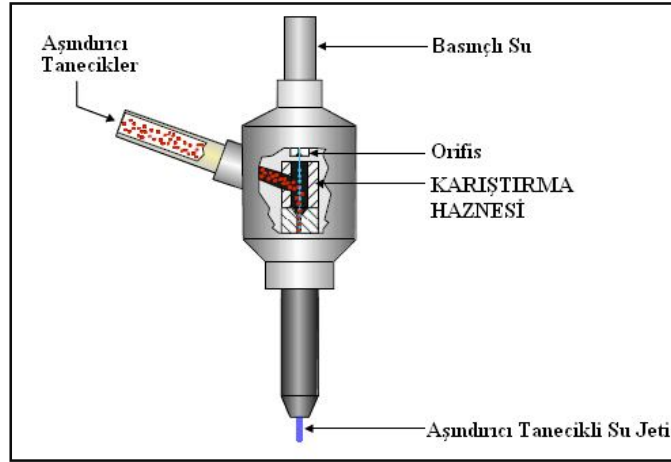
- En önemli mahsurlardan birisi ekonomik olarak kesilebilecek malzeme miktarının sınırlı olmasıdır. elik ve diğer sert malzemeleri keserken kesme hızı oldukça düşmekte ve kesilecek malzemeye harcanan zaman uzun olmaktadır. Bu nedenle SJ’de maliyet artmaktadır.

- Çok kalın parçalar boyutsal doğruluğun sağlanması suretiyle kesilememektedir. Eğer parça çok kalınsa su huzmesi bir miktarda dağınıklık göstermekte ve çarpaz kesim olmakta ya da parçanın alt yüzeyinde üst yüzeyine nazaran daha geniş bir kesim ağzı mümkün olmaktadır. Aynı zamanda yüzeyde desenler kalabilmektedir.

- Kalın malzemelerde ince uç kısmı da bir problem teşkil etmektedir. Su jetinin ucundaki ince uç parçaya değişik açılarda girebilmekte ve bu nedenle boyutsal hassasiyetin bozulmasına sebebiyet verebilmektedir. Halen bu bir problem olarak görülmesine rağmen kafa hızı düşürülmesi bu sorunun önüne geçebilmektedir (www.mfg.mtu.edu, 2011).

3.4.2. Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ)

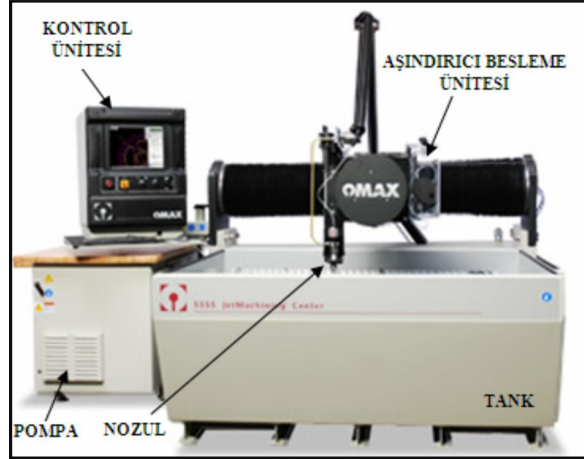
SJ, metal, seramik, kompozit vb. malzemeleri kesme işleminde yeterli değildir. Bu malzemelerin kesimi için ASJ sistemi devreye girer.



Şekil 3.4. ASJ ile kesmede kullanılan kesme kafası (Zhong, 2008)

Basınçlandırılmış su, orifisten geçtikten sonra karıştırma odasına gelir, burada yüksek basıncın sağladığı emiş kuvvetinin etkisiyle aşındırıcıyla karışır. Bu dar karıştırma odasında suyun momentumunun bir kısmının aşındırıcıya transferiyle aşındırıcı, yüksek hızlar kazanarak çok çeşitli malzemeyi kesebilecek kabiliyete erişir. ASJ ile SJ arasındaki temel farklılıklar, aşındırıcılı SJ sisteminde fazladan bir karıştırma odasının ve aşındırıcı besleme mekanizmasının olmasıdır (Coşansu, 2010).

3.4.2.1. Aşındırıcı Su Jeti Makinesinin Elemanları



Şekil 3.5. Aşındırıcı Su Jeti Makinesinin Elemanları (www.omax.com)

- Kontrol ünitesi

Yüksek basınç pompasını çalıştırır, eksen hareketlerini dolayısıyla nozul hareketini ve aşındırıcı besleme sistemini kontrol eder. Sisteme bağlı bilgisayarla kontrol edilir.

- Pompa

Nozul sistemi ile jet karakteristiği kazandırılan su ilk olarak pompa tarafından basınçlandırılır ve sisteme devamlı akışı sağlanır. SJ ile kesme sistemlerinde kullanılan pompa tipleri, doğrudan tahrikli ve basınç yükselticili tiplerdir.

- Basınç yükselticiler

ASJ ile kesme 4000 Bar civarında basınç gerektirir. Geleneksel pompaların 4000 Bar gibi yüksek değerlere çıkamaması özel basınç yükseltme sistemleri ihtiyacını ortaya

çıkarmıştır. ASJ ile kesme sistemlerinde çift etkili ve kademeli olmak üzere iki farklı basınç yükseltme sistemi kullanılmaktadır.

- **Aşındırıcı besleme ünitesi ve aşındırıcılar**

ASJ ile işleme teknolojisini iki gruba ayıran aşındırıcı malzemelerin endüstride kullanımı, ASJ'nin endüstriye girmesinden daha eski tarihlere dayanmaktadır. Örneğin; kumlama tezgahlarında garnet, çelik bilya, cüruf gibi aşındırıcılar kullanılmaktadır. Ancak bu tip uygulamalarda aşındırıcı tane boyutu dağılımı ve saflığı ASJ uygulamalarında olduğu gibi önemli değildir. Zımpara taşı ise en yaygın kullanılan ve en bilinen aşındırıcıdır. Silikon karbür, alüminyum oksit, garnet veya diğer seramik aşındırıcıların kağıt veya kumaşa tutturulmasıyla elde edilen aşındırıcıda tane boyutu dağılımı daha önemlidir (Coşansu, 2010).

3.4.2.2. Aşındırıcılı Su Jetinde Kullanılan Aşındırıcı Tanecikler

ASJ ile kesmede kullanılan aşındırıcılar garnet, olivin, cüruf, alüminyum oksit ve silis kumudur. Lal taşından elde edilen garnet % 90'lık kullanım oranıyla en çok tercih edilen aşındırıcıdır.

Nehir yataklarından elde edilen garnet, sürekli akan suyun etkisiyle yuvarlatılmış kaya yapısındadır. Öğütme işlemiyle keskin köşeli, düzensiz şekilli tanecikler haline alır. Bu geometrideki aşındırıcı, kesmede daha iyi performans gösterir.



Şekil 3.6. Garnetin Görünüşü (Coşansu, 2010)

Kesilen malzeme açısından garnet genel amaçlı bir aşındırıcıdır. Daha düşük sertlikteki malzemelerin kesimi için alternatifi olivindir. Olivin'in sertliği garnet'a göre daha düşüktür ve garnetten daha ucuzdur. Yararı, nozul ömrünü artırmasıdır. Alüminyum oksit ve silisyum karbür, elektro-füzyon metoduyla sentetik olarak üretilen aşındırıcılardır. Sert ve keskin yapılarına bağlı olarak aşındırma kabiliyetleri oldukça yüksektir. Nozul ömrünü kısaltmaları ve pahalı olmaları mahsurlarıdır.

3.4.2.2.1. Aşındırıcı Tanecik Çeşitleri Seçim Kriterleri

Aşındırıcı malzemenin karakteristiğini oluşturan ve ASJ performansını önemli ölçüde etkileyen aşındırıcı tane özellikleri şunlardır :

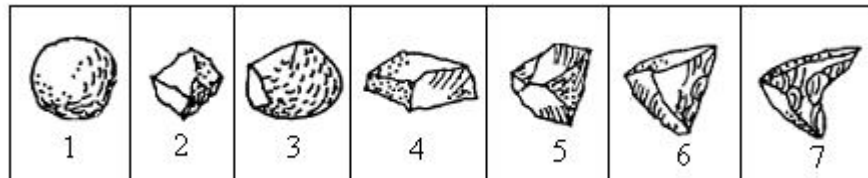
- Tane yapısı (Kafes yapısı, kristalografik grup ve simetri, kimyasal içerik, kırılma özellikleri),
- Tane sertliği,
- Tane mekanik özellikleri,
- Tane şekli,
- Tane boyut dağılımı ve
- Ortalama tane boyutu.

Deneysel çalışmalar, kesme derinliğinin aşındırıcı sertliğiyle arttığını göstermektedir. Ayrıca daha sert aşındırıcı malzeme ile daha yüksek ilerleme hızları kullanılabilir. Sert aşındırıcılar için suyla karışma ve sonrasında ivmelenme esnasında kırılarak keskin köşeler oluşturma mekanizması, düşük sertlikteki aşındırıcılara oranla daha iyidir. Bu da sünek malzemelerin işlenmesinde kolaylık sağlar. Çizelge 3.2.'de ASJ ile kesmede sıklıkla kullanılan aşındırıcıların, Mohs ve Knoop skalalarında sertlikleri verilmektedir.

Çizelge 3.2. Aşındırıcı Malzemelerin Sertlikleri (Coşansu, 2010)

AŞINDIRICI MALZEMELERİN SERTLİKLERİ		
AŞINDIRICI	SERTLİK	
	MOHS	KNOOP
ALÜMİNYUM OKSİT	8-9-	2100
BAKIR CÜRUFU	-	1050
GARNET	7,5	1350
CAM KIRIĞI	5,5	400-600
SERT KAYA GARNET	8+	-
OLİVİN	5,5	1100
SİLİKON KARBÜR	9,15	2500
SİLİS KUMU	-	700
ÇELİK BİLYA	-	400-800
ZİRKONYUM	-	1300

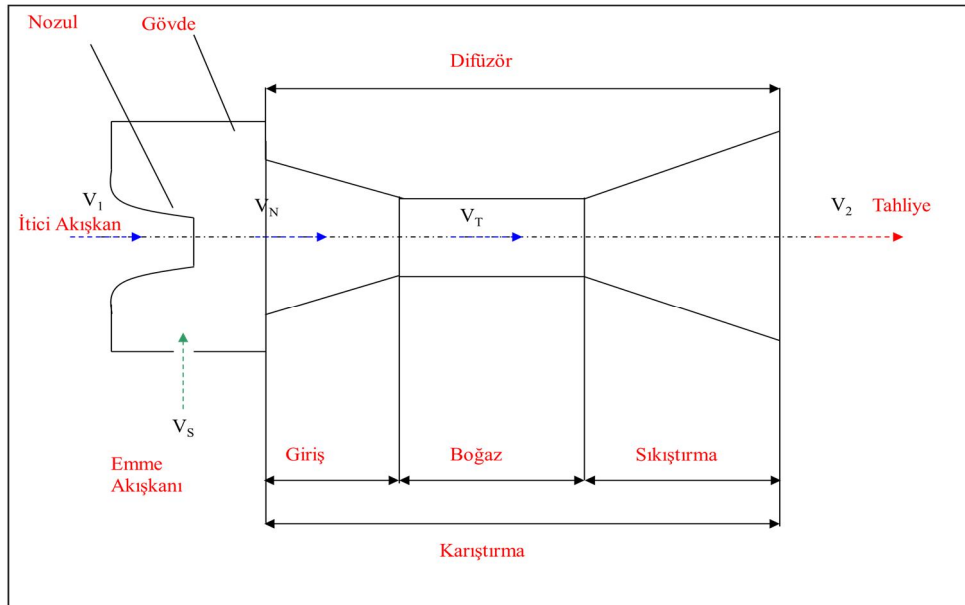
Aşındırıcı şekli kesme performansı açısından etkilidir. Daha önce de belirtildiği gibi keskin köşeler ve düzensiz tane yapısı, kesme işlemini kolaylaştırır. Kesme esnasında yuvarlak yapıya göre daha yüksek kesme kuvveti sağlar. Şekil 3.7.'de farklı aşındırıcı şekilleri verilmiştir.



Şekil 3.7. Farklı Şekillerdeki Aşındırıcı Çeşitleri (Kumar, 2005)

Kaba taneler, incelere oranla daha yüksek hızlarda kesebilirler. İnce taneler ise daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlar. En çok tercih edilen aşındırıcı boyutu 80 meş'dir. Bu değer yaklaşık 0.177 mikrona karşılık gelmektedir. Tane boyutu dağılımı da kesme performansı açısından önemli bir parametredir. Kaba veya çok ince boyutta taneler nozulun tıkanmasına sebep olurlar. En kaba tane boyutu için genel kural, nozul çapının yarısından daha küçük olmasıdır.

3.4.2.2.2. Aşındırıcı Taneciklerin Su Jetine Katılmasında Jet Pompa Etkisi

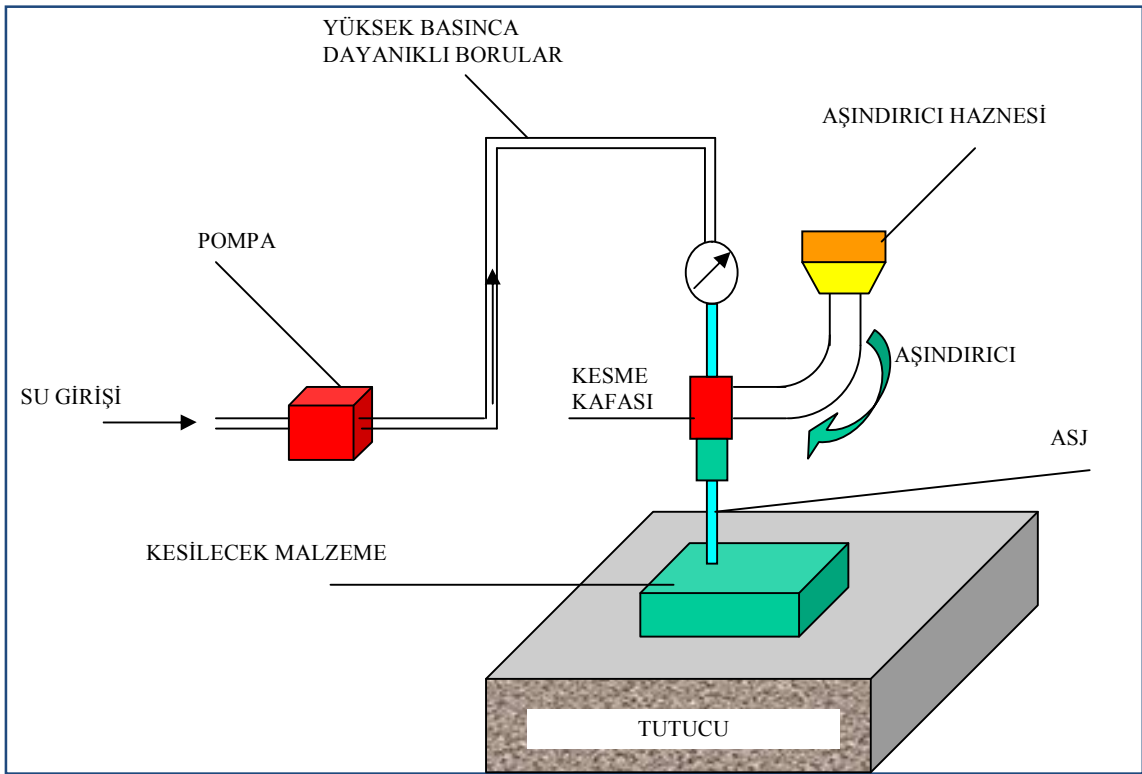


Şekil 3.8. Jet Pompası Şematik Gösterimi

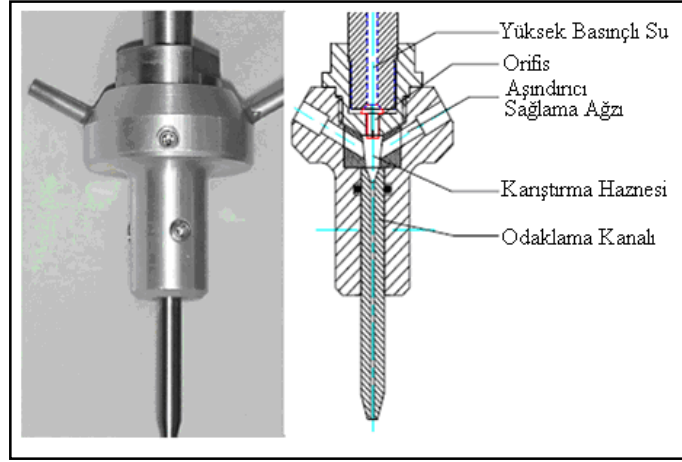
Jet pompa tanımı, ya da ejektör, hareketli parçası olmayan ve kontrollü şartlar altında akışkanlara hareket veren sistemleri açıklar. İtici kuvvet, mümkün olan en yüksek hızı sağlayacak şekilde tasarlanmış, bir nozulun içinden geçen, bir akışkan hüzmeleri tarafından sağlanır. Yüksek hızlı çıkış jeti, emme akışkanın karıştırma odacığına akışını sağlayarak, bu bölgede bir düşük basınç bölgesi meydana getirir. Bu noktada itici ve emme akışkanlarının ortalama hızlarında hareket eden ve tam karışmış

bir akışkan sağlayan bir momentum değişimi vardır. Difüzör, hızı derece derece azaltacak ve tahliye bölgesinde mümkün olan en az kayıpla enerjiyi basınca çevirecek şekilde biçimlendirilmiştir. Ejektörün üç temel parçası, nozul, difüzör ve emme odacıdır (Şekil 3.8.).

Difüzörler akışkanları içeri alarak karıştırıp ve hızını yeniden basınca çevirirken, jet nozulları, basınç enerjisini hıza çevirirler (Şekil 3.9., Şekil 3.10.).



Şekil 3.9. ASJ Sisteminin Şematik Gösterimi (Zhong, 2008)



Şekil 3.10. Aşındırıcının Suya Karışımı Sistematığının Gösterimi (Adel, 2005)

3.4.3. Aşındırıcılı Su Jetinin Faydaları

ASJ'nin diğer kesme yöntemlerinde olmayan pek çok faydaları vardır. Bunlar;

- a. Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) olmaması,
- b. Kesme huzmesinin düşük kesme kuvveti,
- c. Kesilen bölgede yüzey bozulması yada eğilme olmaması,
- ç. Kesim sonunda ikincil bir temizleme işlemine ihtiyaç duyulmadan çapaksız bir yüzey elde edilmesi,
- d. Her malzeme tipine uygun bir kesme yöntemi olması,
- e. Özellikle pahalı malzemelerde ön plana çıkan çapaksız kesim olması,
- f. 0.025 mm mertebesinde hassas yüzey kalitesi elde ediliyor olması,

g. Yaklaşık olarak 0.05 mm.'den 300 mm.'ye kadar kalınlıklardaki malzemeleri kesme yeteneğine sahip olması,

h. Küçük malzeme kesim alanı optimal malzeme kullanımını sağlamaktadır.

ı. Elastikiyet.

3.4.4. Aşındırıcılı Su Jetinin Mahsurları

ASJ' nin mahsurları aşağıda sunulmuştur. Bunlar;

a. ASJ'nin sahip olduğu, nümerik kontrollü yapı, tezgah üzerindeki basınç artırıcılar, nozulun yüksek teknoloji ürünü malzemeden imal edilmesi vb. sebeplerle ASJ diğer kesme tezgahlarına nazaran daha yüksek bir başlangıç maliyeti gerektirmektedir.

b. ASJ tezgahının ürettiği gürültü şiddeti diğer tezgahlara göre daha fazladır.

c. ASJ tezgahının özellikle basınç artırıcılarının bakım maliyeti yüksektir.

ç. ASJ tezgahındaki su arıtma sisteminin hassas olması gerekmektedir. Bu da sistemde bir mahsur olarak karşımıza çıkar.

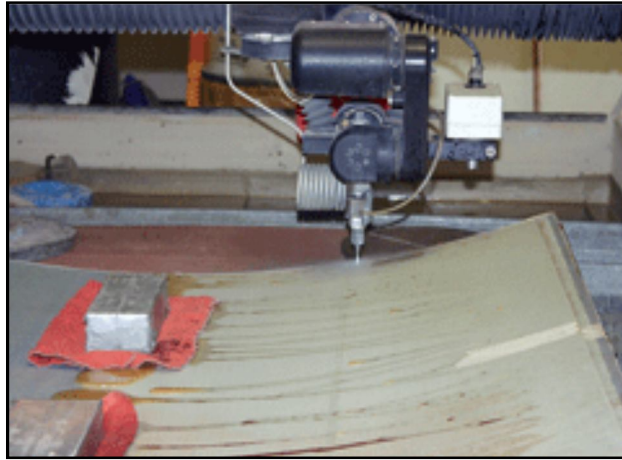
d. Yüksek yüzey kalitesi elde etmek için düşük ilerleme hızlarındaki tezgah kullanımı ise bir başka mahsurdur.

3.4.5. Su Jetinde Kullanılan Basınç Artırıcıların Tasarım Kriterleri

Basınç artırıcı tasarımında, tasarım malzemesinin seçimi oldukça önemlidir. Bu nedenle, basınç artırıcı imalatında kullanılacak malzemelerin hangi mekanik özelliklere sahip olması gerektiği doğru olarak belirlenmelidir. Bu özelliklerden akma mukavemeti ve kırılma tokluğu değerlerinin öncelikle ve titizlikle değerlendirilerek malzeme seçimine gidilmesi gerekir. Basınç artırıcıların sinüzoidal değişimli yüklemeye tabi olduğunu dikkate alıp yorulma dayanımı yüksek, tok malzemelerin kullanılması ve ilgili ısıl işlemlerin doğru olarak yapılması gerekmektedir. Yüksek basınç uygulamalarında karşılaşılan en büyük problem sistem güvenliğini en üst düzeyde tutma zorunluluğudur. Bu nedenle, tasarım üzerinde etkili olan tüm parametreler doğru olarak belirlenmeli ve etkileri dikkatle analiz edilmelidir. Bu parametrelerden en önemlisi iç çap değeridir. Sistemden elde edilecek basınçlı suyun debisi, piston hareketinin salınım hızı, su silindir rodunun burkulmasının önlenmesi ve rod ucundaki sızdırmazlık elemanının sağlıklı şekilde çalışabilmesi için iç çap değeri oldukça önemli bir parametredir. Basınç artırıcı tasarımında diğer bir parametre silindir cidar kalınlığıdır. Cidar kalınlığının gerilmelere etkisi en küçük cidar kalınlıklı tasarımları yaratabilmek için önem taşır. Bu nedenle, en uygun tasarım için değişik silindir iç çapı ve cidar kalınlığı değerlerinde gerilmeler analiz edilmelidir. Bu gereksinme, bu çalışmanın ana nedenlerinden biridir. Ayrıca, su ile temas halinde olan tüm sistemlerin ortak problemi olan paslanma ve aşınmaya uygun çözümler bulunmalıdır. Bunun için kaplama tekniklerinden yada korozif direnci yüksek malzemelerden yararlanılabilir. Fakat daha uygun bir çözüm olarak silindir içine yerleştirilecek paslanma direnci yüksek bronz yada alüminyum türü borular kullanılabilir (Geren ve Tunç, 2000).

3.4.6. Su Jeti ve Aşındırıcı Su Jeti ile Teknolojide Uygulama Örnekleri

SJ ile kesim yönteminin standart işleme yöntemlerine göre daha kullanışlı ve daha ekonomik birçok farklı uygulaması mevcuttur. Aşağıda, SJ ile kesme metodunun kullanıldığı yöntemlerle ilgili olarak uygulamalardan örnekler verilmiştir.



Şekil 3.11. 3 Boyutlu Makine Parçası Kesimi

- Baskılı Devre Kartları:

Büyük kart plakalarından daha küçük ebatta kesim sağlamak amacıyla SJ kullanılmaktadır. Kesme yüzeyindeki daha düşük çentik bırakması, daha dar kesme alanına sahip olması ve çok az miktarda malzemenin atık olması nedeniyle bu tercih edilen bir metoddur. Akış hızının çok iyi yoğunlaştırılmış olması sebebiyle kartın üzerine takılan devre elemanlarının kesim toleransların çok yakın olarak bir kesim yapılması da mümkün olabilmektedir. Bir başka faydası ise testere vb. kesimlerde olduğundan çok daha az vibrasyon meydana geliyor olması nedeniyle baskılı devre kartlarının üzerindeki elemanların çok daha az oranda bozulmaları sağlanmış olmaktadır.

- Kablo Soyulması:

Kablo soyma işlemi de SJ ile yapılan efektif bir işlemdir. Aşındırıcı tanecik kullanılmaksızın SJ kablonun içindeki yer alan iletkende tahribat yaratmadan üstünde yer alan izolasyon malzemesinin sökülmesinde kullanılır. Bu işlem elle yapılan kablo soyulması işleminden daha hızlı ve verimli bir şekilde yapılabilir.

- Gıda Sanayi:

Et gibi gıda maddelerinin kesim işleminin SJ ile çok daha kolay yapılması mümkündür. SJ, ette çok az kuvvet uyguluyor olması sebebiyle etin sıkıştırılmasının önüne geçer ve ilave olarak, çok dar bir kesme açıklığının olması sebebiyle de çok az miktarda artık malzeme ortaya çıkar.

- Takım Çeliği:

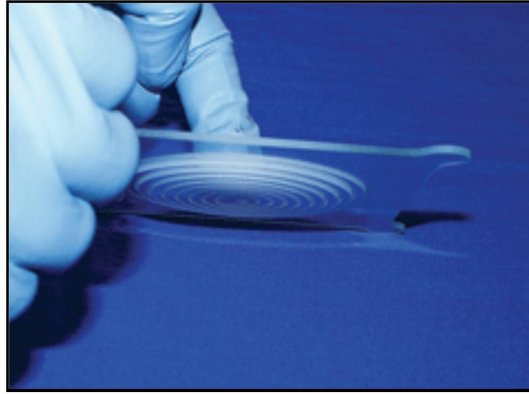
ASJ için sınırlı bir uygulama olmasına rağmen takım çelikleri de bir uygulama şeklidir. Genellikle geleneksel kesim metodlarıyla çelik malzemelerin kesilmesinin çok zor olması ve bu işlem esnasında istenmeyen ısı bölge meydana gelmemesi nedeniyle SJ ile kesim oldukça tercih edilen bir kesim metodudur. ASJ malzeme yapısını değiştirecek bir ısı meydana getirmez ve bu sayede takımda istenilen mukavemet sağlanabilir.

- Ahşap Kesimi:

ASJ ile ahşap kesimi yapılabilir. Çelik ile mukayese edildiğinde ahşap yüzeyinde ikincil bir bitirme işlemine ihtiyaç duyulmaksızın kesim yapmak mümkün olabilmektedir (www.mfg.mtu.edu, 2011).

- Cam Kesimi:

Cam kesimi su jeti için ideal bir kesim uygulamasıdır. Cam yüzeyinde herhangi bir yük söz konusu olmadığı için 1 mm. kalınlığın altındaki su huzmesi ile şekil her ne kadar karmaşık ve hassas olsa da hemen hemen bütün şekillerde kesim yapabilmek mümkündür (www.techniwaterjet.com, 2011). ASJ ile küçük parçalar, yüksek hassasiyet ve doğrulukta, cam yüzeyindeki bütünselliği bozmadan kesilebilmektedir.



Şekil 3.12. ASJ ile Cam Kesme İşlemi

ASJ ile 3 boyutlu kesim işlemi jeti kesim huzmesinin değişken olmayan hareketleri karşılığında dinamik olarak kontrol altında tutulmaktadır (Şekil 3.11.).

ASJ ile kesim yöntemi cam kesme işleminde sık olarak kullanılmaktadırlar. Bugün kullanılan teknoloji sayesinde ASJ ile 0.025 mm mertebesinde kesim yapmak mümkün olmaktadır. (Şekil 3.12.)

3.4.7. Aşındırıcı Su Jetinin Diğer Kesim Yöntemleri ile Mukayesesi

ASJ önemli bir şekillendirme teknolojisidir. Genellikle, ısı etkisi yaratan kesim yöntemlerine nazaran daha yüksek seviyede bir kaliteye ve daha düşük işleme maliyetine sahip olan bir kesim yöntemidir. Hassas bir kesim yöntemi olduğu kabul edilen electrical discharge machining (EDM- Erozyon Tezgâhları) ile kıyaslandığında dahi daha hassas kesim yapabilmektedir. Mukayeselerle ilgili bilgiler aşağıya çıkarılmıştır.

- ASJ'nin yüzey kalitesi, ince malzemeler için lazerle kesme yöntemine yakın ve diğer tüm kesme yöntemlerinden üstündür ancak kalın malzemeler için erozyon tezgahı ile kesme metodu ASJ kesme metodundakinden daha hassas bir yüzey elde edilmektedir.

- ASJ, iletken olmayan kesme metodlarında ısı ile kesim yöntemlerinden daha yavaştır ancak alüminyum gibi iletken malzemelerde ise ısı ile kesim yöntemlerine benzemektedir.

- Plazma ile kesme metodunun en fazla yaklaşık 5 cm. ve lazer ile kesme metodunun ise en fazla 20 mm. ile limitlendiği kesme metodları içerisinde ASJ'nin kesme kalınlığı daha büyüktür.

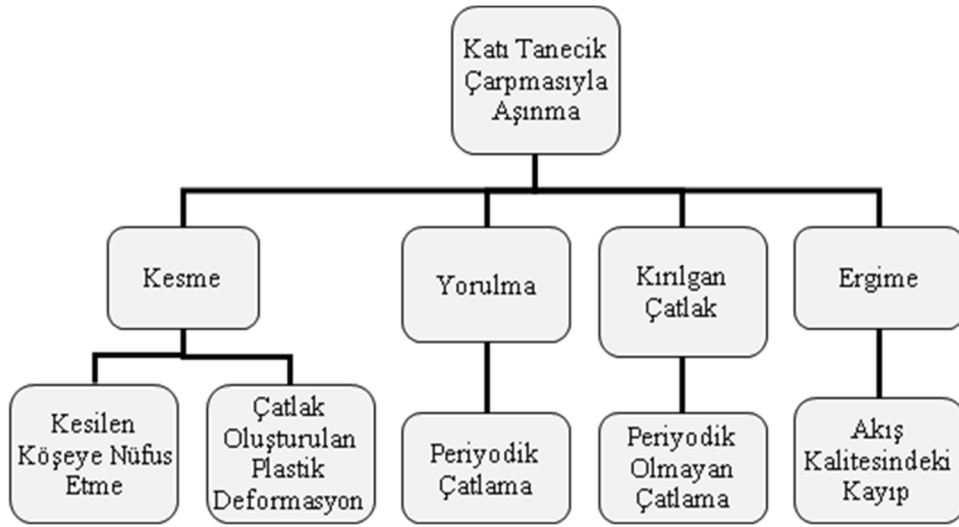
- Çelik ve paslanmaz çeliğin kesme işlemlerindeki kalınlık için yapılan mukayesesinde ASJ'nin kesim birim maliyeti, düşük kesme ve yüksek işletim maliyeti nedeniyle lazer ve plazma ile kesme işlemlerinden daha yüksektir.

- ASJ kesim sonrasında çentiğe neden olmaz ve ikincil işlemlerin olmasının önüne geçer.

Nitelikli bir kesim işlemi olan ASJ uygulamaları ısı bölge olmadan kesim yapmaları nedeniyle tercih edilir. Bu uygulamalar yüksek parça kalitesi ve ikincil işlemlerin olmaması temelinde ön plana çıkmaktadır. Bütün maliyet kriterleri göz önünde bulundurulduğunda ASJ maliyet etkin kesme yöntemi olarak değerlendirilir.

4. AŞINDIRICI SU JETİ ÇALIŞMA PRENSİBİNİN TEORİK ANALİZİ

Aşındırma işlemi, su jetinin yüksek hızda taşıdığı aşındırıcı taneciklerin malzemeye çarpması sonucu gerçekleşir. Aşındırma işleminde malzeme yapısı çok etkilidir. (Şekil 4.1.)



Sekil 4.1. Katı Tanecik Aşınmasıyla Malzeme Aşındırma Sistemleri (Ergür, 2007)

ASJ ile işlenen malzemeler, farklı karakteristik özelliklere sahip olup bazıları kırılabilir, bazıları ise sünekler. Katı taneciğin neden olduğu aşındırmaı daha iyi ifade etmek için, boyutsuz bir aşındırma sayısının (E_N) tanımlanmasında yarar vardır.

$$E_N = \frac{m_M}{m_P} \quad (4.1.)$$

Aşındırılan malzeme yoğunluğu ρ_M , aşındırıcı tanecik kütlesi (m_P) ise katı tanecik için aşındırılan hacim;

$$V_M = \frac{E_N \cdot m_p}{\rho_M} \quad (4.2.)$$

ile hesaplanabilir. Kırılgan özellik gösteren malzemeler için, (4.2.) nolu bağıntıya ilişkin çözüm, aşağıda yazılı maddeler ele alınarak irdelenmiştir. Bunlar sırasıyla;

1. Sünek malzemelerin aşındırılması,
2. Genelleştirilmiş aşındırma bağıntısı ve
3. Sünek malzemeler için, katı taneciğin genelleştirilmiş aşınma modelleri şeklinde özetlenebilir.

(4.2.) nolu bağıntı, malzeme aşındırmada yapılan işin, aşındırıcı taneciğin sahip olduğu kinetik enerjinin bir fonksiyonu olduğunu ifade etmektedir. Tanecik kinetik enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından yutulduğu için, taneciğin sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı, malzeme aşındırma işleminde kullanılmaz. Çarpma açısı dik olduğu sürece (90^0 'ye kadar), malzeme tarafından yutulan kinetik enerji miktarı artarken, aşındırılan malzeme miktarı da o oranda düşer. Ayrıca, tanecik çarpışması ne kadar iyi ise, kesme kalitesi de o derece yüksek olur. Tüm bu etkenler dikkate alınarak aşındırılan malzeme hacmi için, V_M ,

$$V_M = \frac{\lambda_1 \cdot v_p^2 \cdot m_p}{2\varepsilon_M} \cdot \lambda \cdot f\left(\frac{H_p}{H_M}\right) \cdot f(\varphi) \quad (4.3.)$$

şeklinde yazılabilir. (4.3.) nolu bağıntıdaki ilk kesrin pay kısmı, aşındırıcı taneciğin kinetik enerjisi, payda ise birim hacimde yüzeyden malzeme kaldırılması için gerekli olan enerjii gösterir. Bu kesir, tanecik sertliğinin malzeme sertliği oranına ait bir fonksiyon ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Sonuç ifade ise; taneciğin malzemeye çarpma açısının bir fonksiyonu ile çarpılır. λ_1 ve λ çarpım katsayılarıdır (Qualjet, 2005).

4.1. ASJ'de Enerji Korunumun Tanımı

(4.4.) nolu denkleme göre kesme sırasında aşındırılan malzeme miktarı su jetinin kinetik enerjisiyle doğru orantılıdır.

$$\frac{dV_M}{dt} \propto \frac{dE_A}{dt} \quad (4.4.)$$

böylece ,

$$dV_M = h \cdot b \cdot dx \quad (4.5.)$$

ve

$$\frac{dE_A}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m}_A \cdot v_A \quad (4.6.)$$

yazılabilir.

Bernoulli bağıntısı ve momentum korunumu ifadesinden v_A ve v_W için (4.7.) ve (4.8.) bağıntılarının yazılması mümkündür.

$$v_A = \frac{v_W}{1 + (\dot{m}_p / \dot{m}_W)} \quad (4.7.)$$

$$v_W = \sqrt{\frac{2P}{\rho_W}} \quad (4.8.)$$

bulunur. Sonuçta (4.9.)' da verilen oran elde edilir.

$$h.b.v \propto \frac{P\dot{V}_w}{\dot{m}_A} \quad (4.9.)$$

ASJ'nin hacimsel debisini hesaplamak için, aşındırıcı debisi ve kesme genişliği değerlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bunun için (4.9.) daki bağıntıda verilen sabit bir oran oluşturularak elde edilen denklem,

$$h = C_0 \frac{P}{v} \quad (4.10.)$$

halini alır. SJ, sadece bir yönde akmadığı yani ilerleme bileşenlerine sahip olduğu halde jet basıncı, eşik üzerine çıkmadığı sürece, kesme işleminin başlamayacağı kabul edilerek (4.11.) nolu bağıntı elde edilmiştir (Ergür, 2007).

$$h = C_0 \cdot \frac{P - P_{thr}}{v \left(0.86 + \frac{2.09}{v} \right)} \quad (4.11.)$$

Enerji yaklaşımına göre, taneciklerin bir kez çarpmasıyla aşındırılan toplam malzeme miktarı; plastik akışla aşındırılan tanecikler arasında çatlak oluşturan ve aşındırılan sünek malzeme miktarının toplamıdır.

$$V_M = V_{PL} + V_{FR} \quad (4.12.)$$

(4.13.) nolu denklemden de anlaşılacağı üzere, kırılğan malzemelerde belirli hacimde malzeme aşındırma işleminde, enerji dengesi için tanecikler arasında çatlak ağının kopma enerjisiyle, çarpma anında oluşan gerilme dalgaları tarafından yutulan enerjinin (E_{STR}), eşit olması gerekir.

$$E_{FR} = 6 \cdot \gamma_M \cdot V_{FR} / D_M \quad (4.13.)$$

Böylece, çarpma sırasında gerilme dalgaları tarafından yutulan enerji miktarının,

$$E_{STR} = f_e \cdot f(v_M) \cdot \left(\frac{\rho_M}{\rho_a} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{H_M}{E_M} \right)^{1.5} \cdot E_P \quad (4.14.)$$

şeklinde yazılması mümkün olabilmektedir.

4.1.1. ASJ ile Malzeme Kesiminde Enerjinin Aktarımı

Fiziğin temel prensiplerinden biri olan ve iş ile enerjinin korunumu ilkesinden yararlanılan “Enerji Denklemi” ASJ ile kesme işlemini değerlendirme yöntemlerinden birisidir. Birer skaler büyüklük olan iş ve enerji kavramlarından her ikisi için şiddet önem arz etmektedir. ASJ, belirli değerdeki kinetik enerjiyle malzemeye çarpar ve daha sonra malzemeyi yine belirli bir enerjiyle terk eder. Bu iki enerji arasındaki fark çarpma, sürtünme, kesme vb. işlemleri için harcanan enerjidir ve;

$$E_{harcanan} = E_A - E_{ex} \quad (4.15.)$$

ile ifade edilir. ASJ kinetik enerjisi ise, (4.16.) nolu bağıntıda olduğu üzeredir.

$$E_A = \frac{1}{2} m_A v_A^2 \quad (4.16.)$$

Kütle değeri, ASJ’ nin iki temel elemanı olan su ve taneciğin kütleli debi ifadeleri (4.15 ve 4.16) kullanılarak elde edilen enerji bağıntısı,

$$m_A = \left(\dot{m}_p + \dot{m}_w \right) \cdot t \quad (4.17.)$$

olarak yazılır. Tepki süresi ise, odaklama tüpü ve tek bir aşındırıcının hızı dikkate alınarak (4.18.)’ de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$t = \frac{dF}{v} \quad (4.18.)$$

Böylece ASJ’nin kinetik enerji ifadesi,

$$E_A = \frac{dF}{2v} \left(\dot{m}_p + \dot{m}_w \right) \bullet v_A^2 \quad (4.19.)$$

şekline dönüşür.

Elastik olmayan çarpışma için basit bir momentum korunumu denkleminde elde edilen, ASJ hızına ilişkin bağıntı (4.20.)’ de verilmiştir.

$$v_A = \alpha \frac{v_w}{1 + \dot{m}_p / \dot{m}_w} \quad (4.20.)$$

Bernoulli bağıntısından elde edilen (4.21.) nolu denklem yardımıyla su jeti hızına ait pompa basıncı değeri hesaplanabilir.

$$v_w = \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (4.21.)$$

ASJ ile ulaşılabilecek kesme miktarı, kesme derinliği ile tanımlanır. Eğer malzeme kesilmemiş ise, kesme derinliği sıfırdır. Jet değişkenlerinin ulaşabileceği maksimum derinlikte malzeme kesimi söz konusu ise, kesme derinliği $h=h_{\max}$ olur. Deneysel olarak h_{\max} , kesme yüzeyindeki çiziklere göre belirlenir. Kesme yüzeyi tabanında oluşan çizikler birbirine teğet olduğunda, istenilen maksimum kesme derinliğine ulaşılır. Çizikler, kesilen kısmın önceki özelliklerini ifade etmektedir. Boyutsuz bir değişken

olan kesme miktarı (φ), gerçek kesme derinliğinin, ulaşılabilir maksimum kesme derinliğine oranı (4.22.) nolu denklemde olduğu üzere;

$$\varphi = \frac{h}{h_{\max}} \quad (4.22.)$$

şeklinde ifade edilir. Böylece kesme sırasında harcanan enerji miktarı; (4.23.)' de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanır.

$$E_{\text{harcanan}}(\varphi) = \chi(\varphi) \cdot (E_A - E_{ex}) \quad (4.23.)$$

Bu bağıntı, harcanan enerji miktarının, sadece aşındırıcı jetin girişteki ve malzemeyi terk ettiği andaki kinetik enerji değerine bağlı olmadığını, ayrıca malzemenin kesilip kesilmediğine ve eğer kesilmiş ise, kesme verimine de bağlı olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, (4.23.) nolu bağıntıdan da anlaşılacağı gibi malzeme kesilmiyor ise, kesme işleminin sonunda enerji kaybı olmaz. Malzeme maksimum derinlikte kesildiğinde, jet içerisinde harcanan enerjinin tamamı kesme işlemi için kullanılır. Kesme derinliği h_{\max} ' dan küçük sıfırdan büyük ise, enerjinin bir kısmı kesmede diğer kısımları ise sürünme, çarpma, ısıtma ile su-tanecik-film hareketini yavaşlatma gibi işlemlerde harcanmış demektir. SJ'nin kesme kabiliyeti, pompa basıncına bağlıdır. Basınç, belli bir değer üzerinde ise malzeme kesilebilir. Malzemenin kesilebilmesi için, pompanın belirli bir başlangıç basıncına (P_{thr}) ulaşmış olması gerekir. Pompa basıncı, eşik basıncından daha düşük yani $P < 750$ Bar ise, kesme yüzeyinde kopmuş tanecik atıklarına rastlanılmaz. Bu durum, söz konusu basınç değerinde kesme işleminin gerçekleşmemiş olduğunu göstermektedir. Enerji açısından değerlendirildiğinde,

$$P \leq P_{\text{eşik}} \Rightarrow E_{\text{harcanan}} = 0 \quad (4.24.)$$

$$P > P_{\text{eşik}} \Rightarrow E_{\text{harcanan}} = 0 \quad (4.25.)$$

bağıntıları elde edilir. Eşik basıncı, kesme işleminin yapılması için gereken sınır basıncıdır. Sonuç olarak ulaşılan enerji, aşındırıcı su jetinin kesme işlemi sırasında daha fazla malzeme kaldıramayacağı enerji miktarını gösterir. İlk durumda nozul çıkışındaki suyun enerjisi, (4.26.) denklemleriyle ifade edilmiştir.

$$E_{ex} = \frac{\alpha^2 \phi^2 d_F (\dot{m}_p / \dot{m}_w)}{v \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_w} \right) \rho_w} P_{eşik} \quad (4.26.)$$

Eşik basıncından daha büyük bir pompa basıncında, malzemelerin maksimum derinlikte kesilmesi durumunda, su jeti tarafından harcanan enerjinin tamamı kesme işleminde kullanılır.

Eşik basıncının üzerindeki basınçlarda kesme için kullanılan enerji miktarı ise, bağıntı (4.27.) nolu denklemde verilmiştir.

$$E_{harcanan} = \chi(\varphi) \cdot K' \cdot (P - P_{eşik}) \quad (4.27.)$$

Buradaki K' akış katsayısı, (4.28.) nolu denklem yardımıyla hesaplanır (Ergür, 2007).

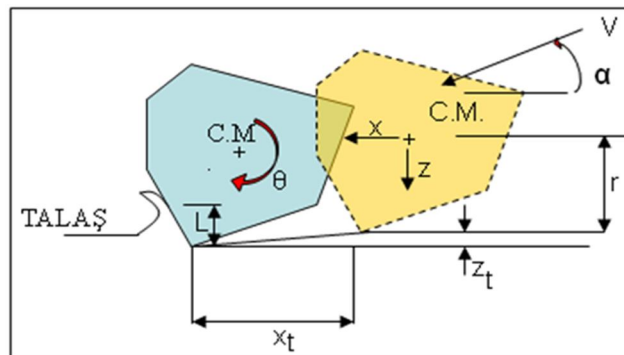
$$K' = \frac{\alpha^2 \phi^2 d_F (\dot{m}_p / \dot{m}_w)}{v \left(1 + \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_w} \right) \rho_w} \quad (4.28.)$$

4.1.2. Hızı Artırılmış Su Jetinde Tanecik Hareketinin İncelenmesi

ASJ yüksek hıza ulaşmış aşındırıcı tanecik taneciklerinin malzeme yüzeyinden koparmalar yapması sistemine dayalı olan bir mikro-makineleme kesme sürecidir. ASJ tarafından malzeme koparılmasında temel hareket tek katı taneciğin etkisidir. Katı taneciklerin yüzeyden malzeme koparmalarına ilişkin olarak araştırmacılar Ludem ve Meng dört farklı alt mekanizma ortaya koymuşlardır. Bunlar, kesme, malzeme yorgunluğu, ergime ve gevrek kırılma olup genellikle yalnız başlarına oluşmayan ancak bir kombinasyon içerisinde beraber oluşan mekanizmalardır. Genelde geleneksel aşınma teorileri sünek ve kırılğan malzemelere uygulanan ASJ prosesi ile ilgilidir.

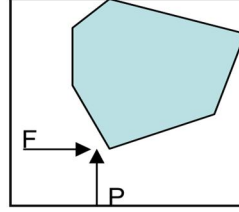
4.1.2.1. Sünek Malzemelerde Aşındırma İşleminin Tanımı

Aşınma prosesi için uygulanan Finnie Analizi kendi akış stresiyle belirlenen malzemenin plastik cevap karakteristiğini öngörmektedir. Hedef malzemedan koparılan malzeme miktarı, plastik deformasyon sayesinde taneciğin uç kısmı tarafından süpürülen malzeme miktarıyla belirlenir.



Şekil 4.2. Sünek Bir Malzeme Üzerinde Bir α Hücum Açısı ile İki Boyutlu Aşındırıcı Kesim İşlemi ve Kesme Geometrisinin Gösterimi (Zhong, 2008)

Şekil 4.2.'de görüldüğü üzere aşındırıcı tanecik malzeme yüzeyinde kendi hareket yolu boyunca bir darbe veya hücumda bulunur. Bu hücum işlemi plastik deformasyon veya kesme işlemine neden olur.



Şekil 4.3. Kesme Sırasındaki Temas Kuvvetlerinin Şematik Gösterimi
(Zhong, 2008)

Taneciğin kesme işlemini, taneciğin hedef malzemeye göre taneciğin yatay hareket yaptığı durumlarda veya tanecik ucunun hedef malzemeyi terk ettiği kabul edilmektedir. Bu model sert ve açılı kenarlara sahip bir taneciğin Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi bir hücum açısı ile parçaya çarpmak suretiyle kesici bir alet gibi taneciğin üzerinde kesme işlemi yaptığı öngörüsüne dayanmaktadır. Malzeme kopma prosesi müddetince tek bir taneciğin hareket yolunu hesapladıktan sonra dar ve geniş açılı hücumlara yönelik ifadeler;

$$V_M = \frac{m_p V^2}{\psi \sigma_f \phi} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{\phi} \sin^2 \alpha \right) \quad \tan \alpha \leq \psi / 6 \quad (4.29.)$$

$$V_M = \frac{m_p V^2}{\psi \sigma_f \phi} \left(\frac{\phi \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad \tan \alpha \geq \psi / 6 \quad (4.30.)$$

şeklini alır. (4.29.) ve (4.30.) eşitlikleri ASJ kesme proseslerinin modellendirilmelerinde kullanılmışlardır. Bu modelde akış stresi, tanecik hızı ve 90^0 'ye yakın hücum açılarında problemlerle karşılaşmıştır.

Araştırmacılar Finnie ve McFadden daha sonra tanecik ile malzeme yüzeyi arasındaki ilişkiye yönelik daha gerçekçi modeller üzerinde çalışmışlardır. Özellikle dar hücum açıları için bu yeni model Finnie'nin teorisini desteklemektedir.

Araştırmacı Bitter, elastik bir kürenin hem plastik hem de elastik olarak deformasyona uğrayan bir malzeme üzerindeki etkisini incelemeye yönelik derin bir çalışma yapmıştır. Bitter, sünek malzemelerin eş zamanlı iki aşınma mekanizmasına maruz kaldığını tespit etmiştir. Birincisi, çarpma sırasında malzeme yüzeyinde tekrarlanan bir şekilde meydana gelen ve sonuçta kopmalara neden olan tekrarlı deformasyondur. İkincisi ise serbest hareket eden taneciklerin kesme etkisidir. Deformasyon aşınması, malzeme yüzeyine paralel yöndeki hızın baskın kesme aşınması ve kesilen malzeme yüzeyine dik olan tanecik hızının bir bileşenidir. Bitter, herhangi bir m_p kütledeki aşındırıcı bir tanecik tarafından malzeme koparılmasını iki formül ile açıklamıştır.

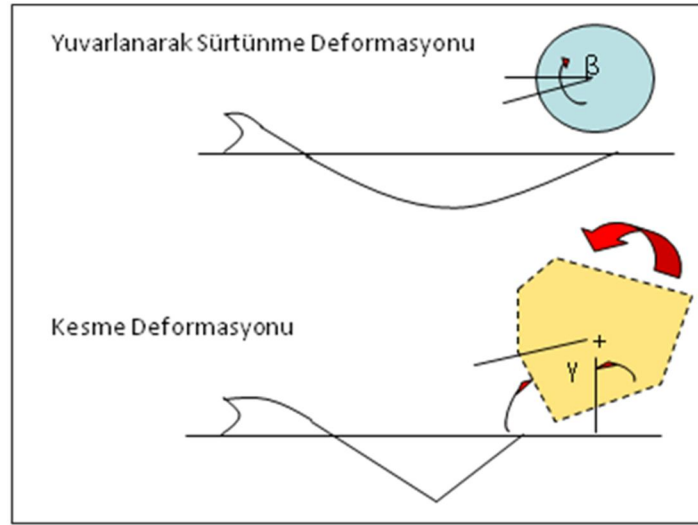
Deformasyon aşınması için;

$$V_M = \frac{m_p (v \sin \alpha - V_c)}{2\varepsilon_d} \quad (4.31.)$$

Kesme aşınması için

$$V_c = \frac{m_p V^2 \cos^2 \alpha - C(v \sin \alpha - V_c)^{\frac{3}{2}}}{2\varepsilon_c} \quad (4.32.)$$

Araştırmacı Hutchings katı tanecik aşındırması boyunca mikro kesme işlemlerine alternatif bir tartışma getirmiş ve Şekil 4.4.'de görüldüğü üzere kesme deformasyonu ve yuvarlanarak sürtünme deformasyonu olmak üzere malzeme koparılmasında iki model olduğunu öne sürmüştür.

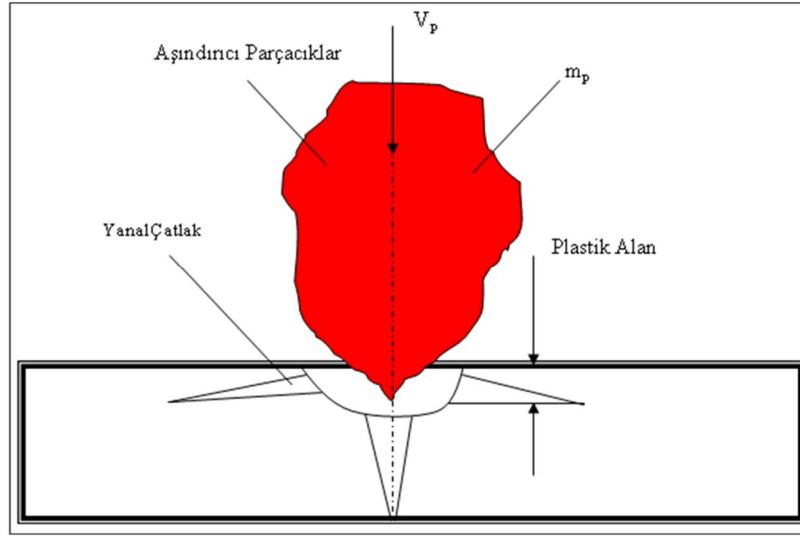


Şekil 4.4. Yuvarlanarak Sürtünme ve Kesme Deformasyonunun Şematik Gösterimi
(Zhong, 2008)

Yuvarlanarak sürtünme deformasyonu aşındırıcı tanecikler arasındaki küresel şekilli tanecikler tarafından sağlanmaktadır. Buna karşın kesme deformasyonu ise açılı kenarlara sahip olan tanecikler tarafından meydana getirilirler.

4.1.2.2. Kırılgan Malzemelerde Aşındırma İşleminin Tanımı

Araştırmacılar Sheldon ve Finnie tarafından çatlak yayılımının ve yarık oluşumunun çarpma etkisi nedeniyle yüzeyde meydana gelen streslerden kaynaklandığına dair bir konik çatlak modeli ortaya konmuştur.



Şekil 4.5. Kırılgan Malzemede Meydana Gelen Kopmanın Şematik Gösterimi
(Zhong, 2008)

Bu modelde $V_M = k_1 R^a v^b$ formülü geçerlidir.

a ve b üstel değerleri için ise;

$a=3(m-0.67)/(m-2)$ Yumuşak kenarlı parçacıklar

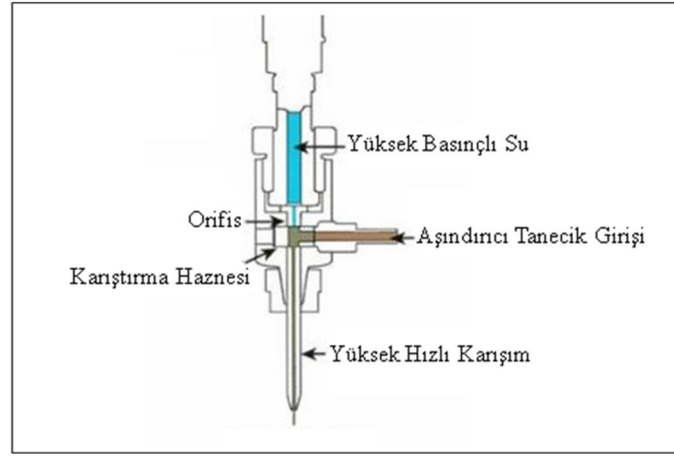
$a=3.6(m-0.67)/(m-2)$ Açılı kenarlı parçacıklar

$b=2.4(m-0.67)/(m-2)$ Hem yumuşak hem de açılı kenarlı parçacıklar

tanımlamaları geçerlidir.

4.1.3. İvmelenmiş Tanecikte Enerji Aktarımının Tanımı

ASJ sisteminde sistemde yer alan aşındırıcı taneciklerin suya karışmaları ve ivme kazanmaları su jetinden taneciklere enerji aktarımı sayesinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.6.'da gösterildiği gibi aşındırıcı taneciklerinin su jetine katıştırılması sırasında sisteme havanın dahil olması durumu da söz konusudur. Nozul çıkışında jetin sahip olduğu enerji, su, aşındırıcı tanecikler ve havadan oluşan üç fazlı bir süspansiyonun kinetik enerjisi halindedir.



Şekil 4.6. ASJ Sisteminde Yüksek Hızlı Karışım Oluşumunun Şematik Gösterimi. (Adel,2005)

Enerji dengesinde $\Sigma E = \text{sabit}$ olduğu sürece (4.33.)'de verilen eşitliği,

$$\frac{\left(\dot{m}_p + \dot{m}_w + \dot{m}_A\right) v_s^2 t}{2} = \frac{t}{2} \left[\left(\dot{m}_w v_w^2\right) + \left(\dot{m}_p v_p^2\right) + \left(\dot{m}_A v_A^2\right) \right] \quad (4.33.)$$

şeklinde yazmak mümkündür. Burada (4.34.) terimi ;

$$\frac{\left(\dot{m}_p + \dot{m}_w + \dot{m}_A\right) v_s^2 t}{2} \quad (4.34.)$$

su ve aşındırıcı taneciklerin arasında elastik olmayan çarpışmadan dolayı oluşacak enerji kaybı dikkate alınmadan elde edilen karışımın kinetik enerjisidir. Yüksek hızlı ortamda üç fazın hızları birbirine eşit olacağı için, radyal hız bileşenleri ihmal edilebilir. Tüm ortamdaki havanın kütleli debisi % 3 seviyesindedir (Meier, 1991). Düşük katı parçacıklar ve hava hızlarının da ihmal edilmesi durumu söz konusu olmaktadır. Karıştırma ve ivmelenme işlemleri sırasında yapılan sadeleştirmeler ve kayıplar, enerji parametresi κ_s ile birleştirilirse (4.35.) elde edilir.

$$\kappa_s = \frac{\left(\dot{m}_p + \dot{m}_w\right) v_s^2 t}{\dot{m}_w v_w^2} \quad (4.35.)$$

κ_s parametresi (4.36.)'da verilen transfer kayıplarını da içine almaktadır. Bunlar sırasıyla;

- Parçacık cidar etkileri,
- Parçacık ezilmesi,
- Havanın ivmelenmesi,
- Türbülans ve

- Parçacık etkileri olarak özetlenebilir. Böylece elde edilen sonuç (4.36.)'da verildiği gibi,

$$\kappa_s = \kappa_{PW} + \kappa_{PP} + \kappa_{PC} + \kappa_A + \kappa_T \quad (4.36)$$

olmaktadır. κ_s parametresi çok sayıda işlem parametresinin bir fonksiyonudur. Bu parametreler;

- Su jeti hızı,
- Tanecik kütleli debisi,
- Taneciğin tanımlanması ve
- Karıştırma odası ve odaklama geometrisidir.

Bu fonksiyon deneysel yolla iki şekilde tespit edilebilir:

Birincisi;

$$\kappa_s = \left(\frac{v_s}{v_w} \right)^2 (1 + \dot{R}) \quad (4.37.)$$

eşitliği kullanılabilir. \dot{R} değeri, $\left(\dot{m}_p / \dot{m}_w \right)$ oranına tekabül etmektedir. Parçacık ve su jeti hızı çeşitli yöntemlerle belirlenebilir.

İkincisi;

$$\kappa_s = \left(\frac{F_s}{F_w} \right)^2 \left(\frac{1}{1 + \dot{R}} \right) \quad (4.38.)$$

Burada hızlar yerine çarpma kuvvetleri kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk kez araştırmacı Hashish tarafından ortaya konmuştur (Ergür, 2007).

4.1.4. Yüksek Hızlı Su Jetinde Enerji Aktarımı

Orifiste meydana gelen enerji transferine ilişkin bağıntı (4.39.) ile verilmiştir.

$$P \cdot \dot{Q}_w \cdot t = \frac{\dot{m}_w \cdot v_w^2 \cdot t}{2} \quad (4.39.)$$

Bu terim basınç kaybı ve orifis girişindeki basınç kaybının da dikkate alınmasıyla ortaya konan üreticinin hidrolik gücüdür.

$$\dot{m}_w = \frac{\pi}{4} d_w^2 \cdot \rho_w \cdot v_w \quad (4.40)$$

(4.40.) denklemleri ile ifade edilen değer ise yüksek hızlı su jetinin kinetik enerjisidir. Su jetinin ivmelenmesiyle orifiste oluşan enerji kayıp katsayısına ilişkin bağıntı ise;

$$K_w = \frac{1}{2} \left(\frac{\rho_w \dot{Q}_w}{\dot{m}_w} \right) \frac{v_w^2}{p} \quad (4.41)$$

$$K_w = \eta^2 \cdot \alpha \cdot \chi = \frac{\dot{F}_w^2}{2 \rho_w \dot{Q}_w p}$$

(4.41.) denklemleri ile ifade edilmiştir. Bu sayede yüksek hızlı su jetinde su jeti çıkış hızı ölçülebildiği müddetçe K_w değeri hesaplanabilmektedir. Bernoulli Denklemi, (4.39.) ve (4.40.) denklemlerinin birleştirilmesi suretiyle, orifis çıkışındaki yüksek hızlı su jeti hızına ilişkin ifade;

$$v_w = \eta \sqrt{\frac{2p}{\rho_w}} \quad (4.42.)$$

elde edilir.

Yüksek hızdaki akışa ait hacimsel debi, keskin köşelerden geçerken düşer. Debi katsayısı bu düşüşü tanımlamak için kullanılır. Debi ise;

$$\dot{Q}_w = C_{d0} \cdot \dot{Q}_w \quad (4.43.)$$

olarak yazılabilir. Su yüksek basınçlar altında sıkıştırılabilmektedir. Bu durumda suyun yoğunluğundaki değişimin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda (4.43.)' da verilen denklem;

$$\rho = \chi \cdot \rho_w \quad (4.44)$$

halini almaktadır.

Sonuç olarak (4.39.) ve (4.44.) nolu bağıntılar birleştirilerek (4.45.) nolu denklem elde edilebilmektedir.

$$K_w = \eta^2 \cdot \alpha \cdot \chi = \frac{F_w^2}{2\rho_w Q_w p} \quad (4.45.)$$

4.1.5. Karıştırma Haznesi ve Su Jetindeki Akış

Şekil 4.6.'da görüldüğü üzere tanecik ve hava karışımı basınçlı su ile bir haznede bir araya gelerek 3 fazlı bir akış meydana getirmektedir.

Emilen katı taneciklere doğrudan enerji aktarımı 4.46. bağıntısında verildiği gibi olmaktadır.

$$\frac{\dot{m}_p v_s^2 t}{2} = \frac{\dot{m}_w v_w^2 t}{2} \quad (4.46.)$$

Tanecik hızı akış sonunda elde edilen süspansiyon hızına yaklaştığında ($v_p \rightarrow v_s$) enerji kayıp katsayısı,

$$\kappa_s = \frac{\dot{m}_p v_p^2}{\dot{m}_w v_w^2} = \left(\frac{F_E}{F_W} \right)^2 \left(\frac{1}{R} \right) \quad (4.47.)$$

şekline dönüşür. Burada su ve katı tanecikler arasındaki elastik olmayan çarpışmaların neden olacağı enerji kaybı dikkate alınmamıştır. (4.46.) nolu denklem incelendiğinde, orifisten geçen suyun daralmaya zorlandığı ve orifis cidarındaki sürtünmenin maksimum olduğu bölgede enerji kullanımının da en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. (4.47.) nolu bağıntı yeniden düzenlendiğinde (4.48.) nolu bağıntı elde edilir.

$$v_w = \sqrt{\frac{2(P - P_L)}{\rho_w}} = \sqrt{\frac{2P(1 - P/P_L)}{\rho_w}} \quad (4.48.)$$

(4.49.)’de verilen su jetine ait olan “sönümlenme katsayısı” ise bu sayede bulunabilir.

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{P_L}{P}} \quad (4.49.)$$

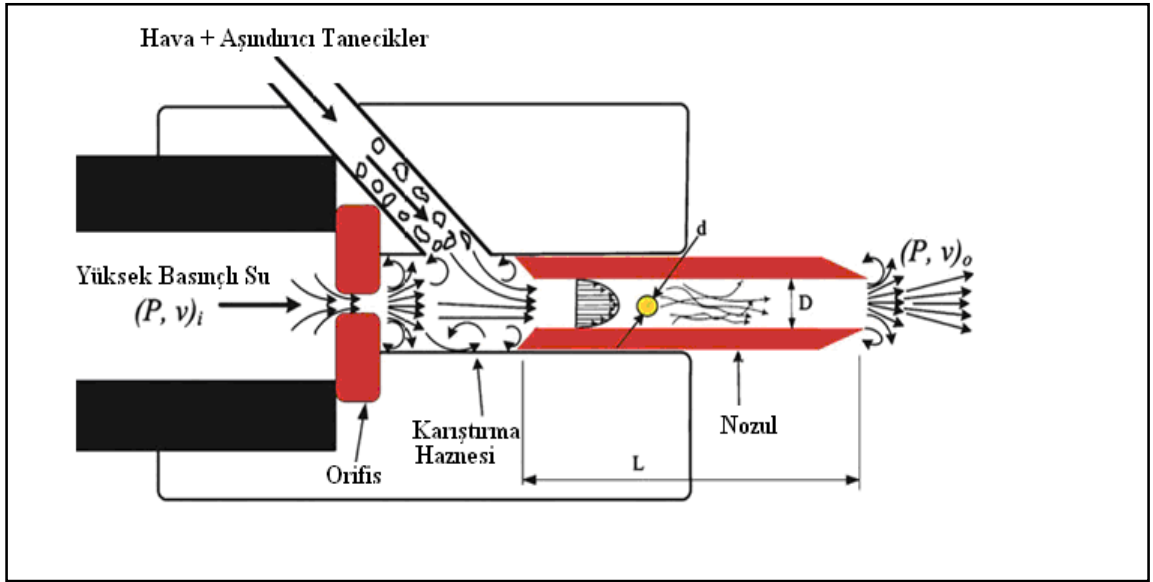
Borulardaki basınç kaybı ise, akış hızıyla ikinci dereceden bir ilişkiyle tanımlanabilir. Bağıntı (4.50.)’da verilmiştir.

$$P_L \propto v_0^2 \quad (4.50.)$$

Su jetinin akış hızı ise (4.51.) formülü ile hesaplanabilir.

$$v_0 = \frac{4}{\pi} \frac{\dot{Q}_w}{d_w^2} \quad (4.51.)$$

Kullanılan basınç artırıcının dolayısıyla pompa basıncının artmasıyla hacimsel debi de artmış olacaktır. Böylece pompa basıncındaki artışla, sürtünmeden kaynaklanan basınç kaybı da artarak hız katsayısının düşmesine neden olmaktadır.



Şekil 4.7. Su Jetindeki Karıştırma Hazinesindeki Tanecik Hareketi (Kumar, 2005)

Araştırmacılar, pompa basıncındaki artışın debi katsayısını düşürdüğünü ve debi katsayısı için ideal değerlerin ise 0,62~0,75 değerleri arasında olduklarını belirtmişlerdir (Ergür, 2007). Sıvı basıncının bir fonksiyonu olarak yoğunluk için belirlenmiş olan lineer elastik yaklaşım (4.52) formülü ile verilmiştir.

$$\frac{\partial P}{Y_w} = \frac{\partial P_w}{\rho_w} \quad (4.52.)$$

(4.52.) nolu ifadenin integrasyonu ile (4.53.) nolu denklem elde edilmiştir.

$$\rho_w(P) = \rho_w \exp\left(\frac{P}{Y_w}\right) \quad (4.53.)$$

Yüksek hızlı su jetinin bir fonksiyonu olarak, karıştırma ve ivmelenme işlemine ait enerji transfer verimi ele alındığında, üç farklı özellik görülür. Birincisinde, su jeti hızı arttıkça, enerji transfer verimi de yaklaşık lineer olarak artmakta, ikincisinde ise verim, $0,30 < \kappa_s < 0,66$ arasında değişim göstermektedir. Böylece su jeti enerjisinin ortalama % 50'sinin yüksek hızlı üç fazlı karışım tarafından taşındığı tespit edilmiştir. Üçüncüsünde ise çarpma kuvveti ve katı tanecik hızına ilişkin ölçümler birbiriyle uyumaktadır.

$$0,5 = \kappa_{PW} + \kappa_{PC} + \kappa_A + \kappa_T \quad (4.54.)$$

Taneciğin ezilmesi ile yutulan enerji miktarı κ_{PC} , denklem (4.54.) yardımıyla ifade edilmiştir.

$$\kappa_{PC} = \frac{E_{PC}}{E_w}, \quad E_{PC} = w_i \frac{\sqrt{d_{pin}} - \sqrt{d_{pex}}}{d_{pex}} \sqrt{\frac{100}{d_{pin}}} \quad (4.55.)$$

d_{pin} karıştırma odasında girişindeki tanecik çapı, d_{pex} ise çıkıştaki tanecik çapı olmak üzere ezilen parçacıkların kinetik enerjisi (4.55.)'de verilen bağıntı yardımıyla hesaplanabilir. Araştırmacılara göre su jeti girişindeki enerjinin sadece % 5'i tanecik kırılmasında kullanılmaktadır. Böylece, $\kappa_{PC}=0,05$ olmak üzere türbülansın neden olduğu enerji yüksek hızlı üç fazlı karışıma ait türbülans derecesi (4.56.) nolu denklem kullanılarak hesaplanabilir. Türbülansın neden olduğu enerji değerinin $\kappa_T = 0,15$ alınması önerilmektedir. Havanın ivmelenmesi ve jet yapısındaki bozulmalar nedeniyle

giriş enerjisinin % 50'si yutulabilir. Katı parçacık ilavesiyle hacimsel hava debisi % 70 oranında azalmaktadır.

$$\kappa_T = \frac{\sigma_{vp}}{v_p} \quad (4.56.)$$

$\kappa_{AP} = 0,7$ ve $\kappa_A = 0,35$ için üç fazlı karışımda su jeti giriş enerjisi (4.57.) nolu eşitlikle elde edilmektedir. (Ergür, 2007)

$$E_s = \kappa_S E_w = \kappa_{SW} + E_{SP} = (\kappa_{SW} + \kappa_P) E_w \quad (4.57.)$$

4.1.6. Kesme Anında Yüzeyde Oluşan Çarpma Etkisinin İncelenmesi

Kesme anında yüzeyde meydana gelen çarpma etkisinin jet dağılımı ve jetin performansına bağlı olup kesme derinliği ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir.

4.1.6.1. Aşındırıcı Su Jetinde Kesme Jet Dağılımının İncelenmesi

Kütlesel Debi ifadesini içeren parçacık hızı aşağıdaki denklemde verilmiştir. Kütlesel debinin artmasıyla beraber parçacıkların birbirlerine çarpma ihtimalinin de arttığının göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu nedenle parçacıkların sahip olacağı kinetik enerjilerin de düşeceği göz önünde bulundurulmalıdır.

$$v_p(\dot{m}_a) = \eta_T(\dot{m}_a) \cdot \frac{v_0}{1 + \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w}} \quad (4.58.)$$

Jetin dağılımında ve hızdaki azalmanın havadaki etkisi, kesmenin olduğu bölgeye ve malzeme karakteristiklerine bağlıdır. Eksenel ve radyal basınçtaki azalma karakteristikleri araştırmacı Hashish tarafından ortaya konmuş ve aşağıda sunulmuştur.

Eksenel;

$$\text{Giriş Bölgesi} \quad P_m = P_1 \quad X < X_c \quad (4.59.)$$

$$\text{Ana Bölge} \quad P_m / P_1 = X / X_c \quad X > X_c \quad (4.60.)$$

Radyal;

$$\text{Giriş Bölgesi} \quad P/P_m = (1 - \zeta_c^{3/2})^2 \quad \zeta_c = Y - Y_c / b_c \quad (4.61.)$$

$$\text{Ana Bölge} \quad P/P_m = (1 - \zeta_c^{3/2})^2 \quad \zeta = Y / b_m \quad (4.62.)$$

Ana bölgedeki ortalama dinamik basınç değeri malzeme üzerinde bir eşdeğer hidrodinamik jet kuvveti oluşturmaktadır. Ortalama dinamik basınç değeri (4.63.) bağıntı yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$P_{ort} = 0,257 \cdot P_1 \cdot \left(\frac{X_c}{X} \right) \quad (4.63.)$$

Başlangıç bölgesindeki jet hareketi doğrusal bir harekettir. Ana bölgedeki jet eni nozul çıkışından olan mesafenin karekökü ile orantılıdır. Böylece ana bölgedeki jet eni (4.64.) bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

$$w = 0,335 \sqrt{d_n X} \quad (4.64.)$$

(4.64.) nolu bağıntının düzenlenmesi suretiyle (4.65.) nolu boyutsuz denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{w}{d_n \sqrt{R}} = 0,335 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \quad (4.65.)$$

Giriş bölgesindeki jet uzunluğu, nozul şekline ve basınca bağlıdır. Burada $R=X_c / d_n$ bağıntısı baz alınmıştır. R için 30-100, 100-140 ve 0-110 arasındaki değerler önerilmektedir.

(4.65.) ve (4.66.) nolu denklemler jetin ana bölgesindeki $\sigma_c < \rho V^2 = 2P$ bağıntısını sağlamak şartıyla oluşturulmuştur.

$$\frac{w_e}{d_n \sqrt{R}} = 0,335 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \left[1 - \frac{\sigma_c}{2P_1} \frac{X}{X_c} \right]^{2/3} \quad (4.66.)$$

(4.65.) ve (4.66.) nolu denklemlerdeki ifadeler sırasıyla

$\frac{w_e}{d_n \sqrt{R}}$ genişlik sayısı,

$\frac{\sigma_c}{P_1}$ basma mukavemeti sayısı,

$\frac{X}{X_c}$ ise standof mesafesi yani nozulun uç kısmının işlenecek malzemedan uzaklığı

olarak tanımlanırlar. Burada üst limit $\frac{\sigma_c}{P_1} = 0,5$ olarak alınabilir. (4.66.) nolu ifadeye

görüleceği üzere kesme derinliği $d_n \propto z$ olduğundan $w_e \propto z$ olur. $\frac{X}{X_c}$ oranı artarken w_e

değeri de artmaktadır. Buna karşılık, dinamik basınç azalacağı için kesme miktarı (z), daha etkili olan parametreye bağlı olarak azalmakta veya artış göstermektedir. (4.66.) nolu bağıntıda yer alan nozul çıkışındaki parçacık enine bağlı olarak değişen

genişlik sayısı sıfır olduğunda, standof mesafesinin sınır değeri (4.67.) nolu bağıntı ile hesaplanabilir.

$$X_{\text{limit}} = \frac{2P_1}{\sigma_c} X_c \text{ ve } X_{\text{limit}} = 2R \frac{P_1}{\sigma_c} \quad (4.67.)$$

Bu mesafede $\frac{\sigma_c}{2P_m} = 1$ olduğu için, basma mukavemeti jetin malzeme üzerindeki hidrodinamik gerilmeye eşit olmakta ve kesme meydana gelmemektedir. $X > X_{\text{lim}}$ olan mesafelerde jet, malzemede tekrarlanan su damlacıkları çarpımından dolayı plastik deformasyona ya da yorulmaya maruz kalırlar. Jetin efektif eninin hesaplanmasında, ortalama basınç değeri bir sonraki kesit için kullanılabilir. Ana bölge için efektif jet eni (4.62.) ve (4.66.) nolu bağıntılar kullanılarak belirlenebilir. Sonuç olarak elde edilen plastik deformasyon katsayısı

$$\psi = \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_c}{2P_1} \frac{X}{X_c}} \right) \quad (4.68.)$$

olarak yazılır. Böylece su jeti basıncı (4.69.) nolu denklem vasıtasıyla hesaplanır.

$$P_w = 2P_1 \cdot \frac{X}{X_c} \cdot (0,5 - 0,57\psi + 0,2\psi^2) \quad (4.69.)$$

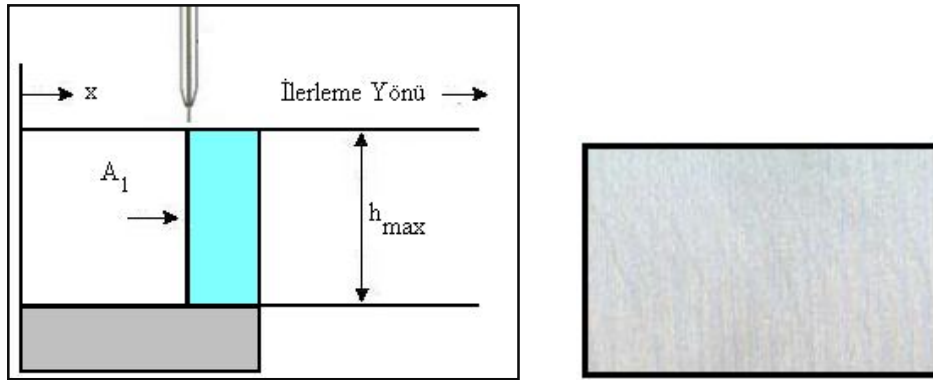
4.1.6.2. Su Jetinin Performansının İncelenmesi

Kesme derinliği ve kesme kalitesini de içine alan makineleme performansı ASJ'deki en çok tartışılan konuların başında gelmektedir. Araştırmacılar Hoecheng ve Chang tarafından yapılan çalışmalarda yeterli miktardaki hidrolik enerji ve hassas ayarlanmış aşındırıcı taneciklerinin aşırı yüksek olmayan bir hızla parçacıklara

çarpmaları sayesinde kaliteli bir kesme yüzeyinin elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır (Adel, 2005).

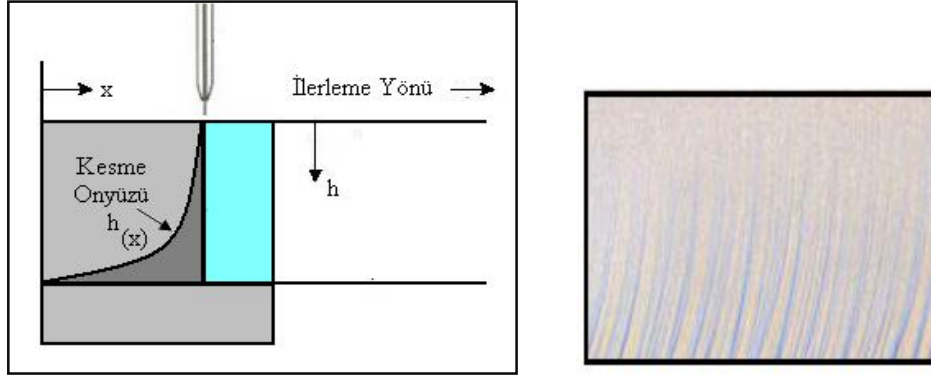
4.1.6.2.1. Kesme Derinliğinin İncelenmesi

ASJ ile verimli bir kesme elde etmek için istenilen kesme şekli Şekil 4.8.'de verilmiştir.



Şekil 4.8. İdeal Kesme Şekli ve Yüzeyin Görünüşü (Ergür, 2007)

Ancak yapılan deneyler ve incelemeler neticesinde kesme yüzeyinin Şekil 4.9.'da verildiği üzere eğrisel olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Gerçekte Karşılaşılan Kesme Şekli ve Yüzeyin Görünüşü (Ergür, 2007)

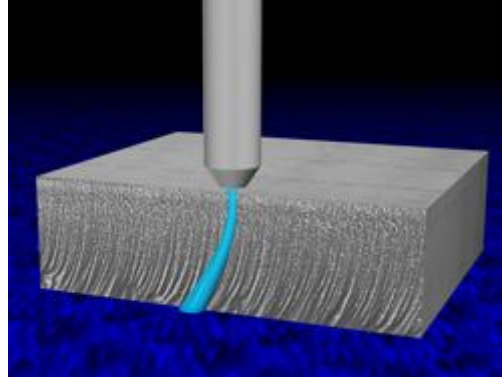
Şekil 4.9.'da karşılaşılan bu eğrisel sapmaya, kesilen yüzeyin alt kısmında meydana gelen çizikler neden olmaktadır. Burada kesme sonunda elde edilen parabol (4.69.) formülü ile hesaplanmaktadır.

$$h(x) = \alpha(x - g)^2 + c \quad (4.69.)$$

Su jetinin kesimi yapılacak hedef malzemeye giriş noktası orijin olarak kabul edildiğinde, bu parabol kesme noktasında; $x=-b$ ve $h(x)=-h_{\max}$ değerini almaktadır. $a = h_{\max}/b^2$, $g=-b$ ve $c = h_{\max}$ için elde edilen denklem (4.70.) ile verilmiştir.

$$h(x) = \frac{h_{\max}}{b^2}(x + b)^2 - h_{\max} \quad (4.70.)$$

Şekil 4.11.'den görüldüğü üzere b ve h_{\max} değerlerinin dışında çizik oluşan çiziklerin tanımlandığı noktalar eğri üzerinden tanımlanabilir. b ve h_{\max} değerlerini belirlemek için, maksimum kesme derinliği şartı aranmaz.



Şekil 4.10. Kesmede Çiziklerin Oluşumu

Kesme önyüzündeki alan (A_0),

$$A_0 = h_{\max} b - \int_{-b}^0 h(x) dx = \frac{1}{3} h_{\max} b \quad (4.71.)$$

şeklinde tanımlanır. $h(x)$ değeri maksimum kesme derinliği (h_{\max}) değerinden daha küçük ise (4.71.) nolu bağıntı kullanılmaktadır. Buna göre, ideal ve gerçek kesme arasındaki farkı $A(h)$ değeri (4.72.) bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Bu bağıntının çözümü için x 'in hesaplanması gerekmektedir.

$$A(h) = h(x)x - \int_{-b}^0 h(x) dx \quad (4.72.)$$

$$h=h(x) \quad (4.73.)$$

Bunun için mutlak değer içerisindeki iki kök arasından küçük olan tercih edilir. $A(h)$ 'nin A_0 'a bölünmesiyle elde edilen fonksiyonda $0-h_{\max}$ arasında değişen kesme derinliği, $0-1$ arasında değer alır. Enerji kayıp katsayısı ve parçalanma sayısı (ϕ), (4.74.) nolu bağıntıda verilen ifade aracılığıyla hesaplanır.

$$\chi(\phi) = \frac{A(h)}{A_0} \quad \text{ve} \quad \phi = \frac{h}{h_{\max}} \quad (4.74.)$$

Sonuçta,

$$\chi(\phi) = A_1\phi^2 + B_1\phi + C_1 \quad (4.75.)$$

elde edilir.

Kesme derinliğinin (h_{\max}) 'a yaklaştığı durumlarda kullanılan faydalı enerji miktarı yani enerji kullanım verimi artmış olacaktır.

$\chi(\phi)$ değeri kesme tabanındaki çiziklerin eğimine göre hesaplanır. (4.70.) nolu bağıntının türevi alınarak kesme derinliğine ilişkin eğim değeri (4.76.) nolu ifade elde edilmiştir.

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{2h_{\max}(x+b)}{b^2} = m \quad (4.76.)$$

(4.76.) nolu bağıntının çözümü ile bulunan x değeri, $h(x)$ 'de yerine yazılarak kesme derinliği hesaplanır.



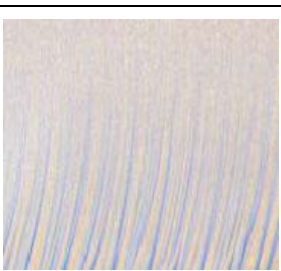
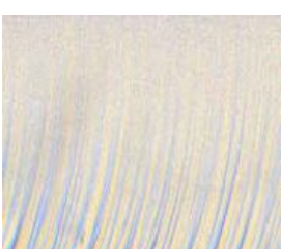
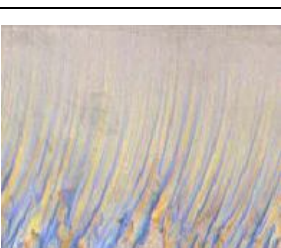
$$\phi = \frac{h(x_m)}{h_{\max}} \quad (4.77.)$$

Bağıntıdaki x_m (4.77.) nolu denkleminde x değişkenin koordinatıdır. Elde edilen (4.77.) nolu bağıntı yardımıyla (4.75.) nolu bağıntıda verilen $\chi(\phi)$ değerini de hesaplamak mümkündür.

4.1.6.2.2. Aşındırıcı Su Jetinde Kritik ve Optimum İlerleme

Kesme derinliği, kesme eni, aşındırılan hedef malzeme ve özgül enerji hesaplamaları ile ASJ'nin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bunlar jet parametreleri (Nozul çapı, basınç, dağılım katsayıları ve nozul sürtünme kayıpları vb.), kesme parametreleri (Standof mesafesi, ilerleme miktarı ve paso sayıları vb.) ve malzeme özellikleri (Basma ve kopma gerilmesi, malzemeye ait yapısal özellikler ve jet ile hedef malzeme arasındaki sürtünmenin hidrodinamik katsayısı vb.) ile ifade edilir (Ergür, 2007).

Kesme kalitesi kesme kenarları ve kesici jetin ucuna bağlıdır. İlerleme hızı kesme anında uygulanan jet miktarını kontrol eder. Kesme hızı ve yüzey kalitesi birbirleri ile doğrudan orantılıdır. Yüksek ilerleme hızlarında jet kesme boyunca ilerlerken jet eğilmeleri oluşturur. Düşürülmüş kesme hızı yaklaşık 0.025 mm mertebesinde yüzey hassasiyeti sağlanmasını ve bu şekilde güzel bir görünüm elde edilmesini sağlayabilir. Ayrılma için yüksek ilerleme hızlarında tam kesme derinliği boyunca eğimli çizgiler oluşmasına neden olabilir.

1		Mükemmel. (Kavisli çizgi yok. Hassas yüzey elde edilmiş.)
2		Çok iyi. (Çok az kavisli çizgi var.)
3		İyi (Kesmenin alt yarısında çizgiler mevcut. Genellikle kullanılan bu tarz kesmedir.)
4		Kısmen uygun (Boylu boyunca çizgiler olması sebebiyle iyi olarak kabul edilmemektedir.)
5		Zayıf ve çok az kullanılan. (Çok derin çizikler mevcuttur.)

Şekil 4.11. Yüzey Kalitesinin Tasniflenmesi (Waterjet Cutting White Papers, 2011)

4.1.6.2.3. Kesme Hassasiyetinin Belirlenmesi

ASJ ile kesme işlemlerinde hassasiyetin bağlı olduğu iki ana kriter ve bunlara ait alt kırılımlar mevcuttur.

Ana kriterler;

- Su jetinin hassasiyeti ve
- Tezgahın hassasiyeti şeklindedir.

Tezgahın hassas olması kesici su jetinin ilerlemesinde önemli bir etken olup istenilen yüzey hassasiyetinin elde edilmesinde tek başına yeterli olmamaktadır.

Yukarıda bahsedilen ana kriterlere ilave olarak;

- İlerleme hızı,
- Basınç,
- ASJ huzmesi,
- İş parçasının kararlılığı ve homojenliği,
- Tutucu kalıplar,
- Ortam sıcaklığı vb. alt kırılımların da yüzey hassasiyetinde etken olduğu bilinmektedir.

4.1.6.2.4. Kesme Verimi ve Optimum Kesme Şartlarının Belirlenmesi

Temel olarak “Kesme Verimi” aşındırılan malzeme için kullanılan enerjinin giriş enerjisine oranı, özgül enerji (SE) ise girişteki jet enerjisinin malzeme aşındırmak için harcanan enerjiye oranı olarak tanımlanmaktadır.

Kesme Verimi,

$$\eta_c = \frac{\Delta \dot{V}}{\frac{1}{2} m \dot{V}_1^2 t} \quad (4.78.)$$

şeklindedir. Buradaki t ifadesi $\dot{\Delta V}$ hacminin aşındırılması için geçen zamanı ifade etmektedir. Kesme işleminde birim boy için aşındırılan hacim (4.79.) formülü hesaplanmıştır.

$$\frac{\dot{\Delta V} C_f}{R d_n^2} = 0,0994 \sqrt{\frac{X}{X_c}} \psi^{2/3} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1\phi} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P_1 / \eta u \phi)} \right] \quad (4.79.)$$

Bunun için geçen süre $t=1/u$ şeklinde ifade edilmektedir. Buna göre (4.78.) ve (4.79.) nolu bağıntılar birlikte düzenlendiğinde (4.80.) nolu bağıntı elde edilir.

$$\frac{\eta_c V_1 \eta}{R} = 0,1256 \left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \frac{\psi^{4/3}}{\left(\frac{C_f P_1}{\eta u} \right)} \cdot \left[1 - \frac{\sigma_y}{2P_1\phi} \right] \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P_1 / \eta u \phi)} \right] \quad (4.80.)$$

$\eta_c = 1/SE$, eşitliğinin kullanılması suretiyle (4.81.) nolu bağıntı elde edilir.

$$\frac{SE \cdot R}{V_1 \eta} = 7,96 \cdot \frac{\left(\frac{C_f P_1}{\eta u} \right)}{\left(\frac{X}{X_c} \right) \cdot \psi^{4/3} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_y}{2P_1\phi} \right)} \cdot \left[1 - e^{-2,256(C_f P_1 / \eta u \phi)} \right] \quad (4.81.)$$

Bazı malzemelerin kesiminde sabit nozul kullanarak en yüksek verime ulaşabilmek amacıyla maksimum miktarda malzeme koparılması gerekmektedir. $\eta \cdot u / C_f P_1 > 10$ için verim maksimum değere ulaşır.

5. YÜZEY KALİTESİ

Yüzey hassasiyeti, yüzey pürüzlülüğü, yüzey çatlakları, kimyasal değişme, yanma, temperlenme gibi termal hasarlar ve kalıcı gerilme gibi pek çok parametreyi içine alan bir terimdir.

Yüzey kalitesi ise istenilen niteliklerde bir yüzey elde etmek amacıyla kullanılmaktadır.

ASJ ile kesme uygulamaları günden güne yaygınlaşmaktadır. Bu yaygınlaşma yüzey kalitesinin değerlendirilmesine yönelik özel çalışmaları da beraberinde getirmektedir. Konuya ilişkin farklı malzemeler ve değişik tezgah parametreleriyle birçok optimizasyon çalışması yapılmış olup, lazer ile kesme vb. tezgahlarla kıyaslandığında işletim maliyeti açısından ASJ ve SJ ön plana çıkmaktadır.

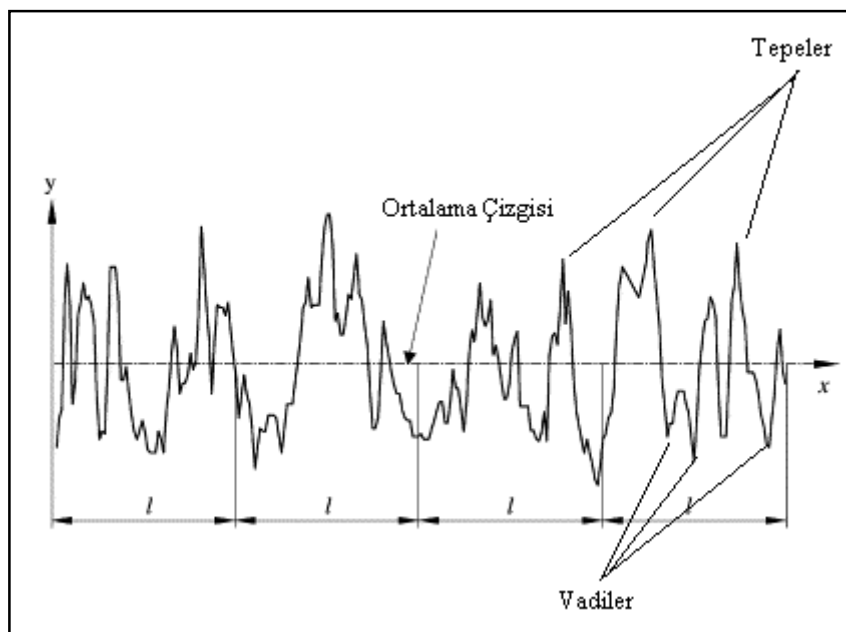
Pürüzlülük ölçüm aparatının kalibrasyonu, pürüzlülüğü önceden bilinen standart bir yüzeyden faydalanılarak yapılabilmektedir. Standart olarak alınan yüzey üzerinde lazerli ve mekanik aparatlar ile yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar arasındaki fark % 1'den daha az çıkmaktadır (Küleççi ve Akkurt, 2001).

Endüstride uydu, uçak, araba gibi karmaşık yapılardan sadece tek başına kullanılan tutucu, sabitleyici vb. parçalara kadar her bir parçanın istenilen bir yüzey hassasiyeti mevcuttur.

İmalat sanayinde kullanılan parçaların makilenmesi esnasında işleve sahip olan tutucu, sabitleyici vb. parçaların hassasiyeti yerine göre kaba olarak imal edilmekte oysa havacılık sanayii, ilaç sanayii vb. sanayii dallarında kullanılan makine ve donanımın birçok parçası ise hassas olarak belirlenmekte ve belirlenen bu yüzey hassasiyetine göre imalat yöntemi tespit edilmektedir.

5.1. Yüzey Kalitesinin Anlatımı ve Belirlenme Parametreleri

Yüzey pürüzlülüğü malzemenin kesilmesi, makilenmesi sırasında yüzey üzerinde meydana gelen düzensiz çizikler olarak ifade edilmektedir. Endüstriyel ürünler için yüzey pürüzlülüğüne yönelik nitelendirme ve işaretlemeler tanımlanmıştır. Genel itibariyle; matematiksel ortalama pürüzlülük (R_a), maksimum profil yüksekliği (R_y yada R_t) ve on - nokta ortalama pürüzlülüğü (R_z) yüzey hassasiyetinde kullanılan parametrelerdendir. Pürüzlülük analizinde grafikteki ortalama çizginin üstündeki noktalara tepeler (hills) adı verilir. Ortalama çizginin altındaki noktalar ise vadiler (valleys) olarak isimlendirilir.



Şekil 5.1. Pürüzlülük Analizi Grafiği (www.misumiusa.com, 2009)

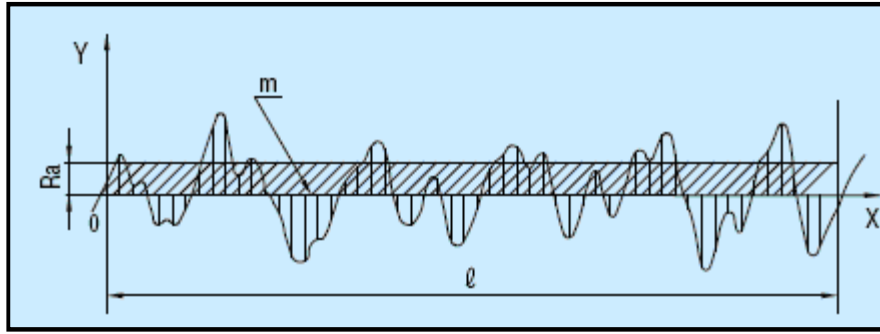
5.1.1. Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (R_a)

Pürüzlülük analizi sonucu elde edilen grafikte görüldüğü gibi bir örnekleme boyu belirlenir. Burada x ekseninin örnekleme boyunu gösterdiği ve y eksenine ise

tepeler ve vadileri gösterdiği bir kartezyen koordinat meydana gelmiştir. Miktormetrede Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (R_a) değeri aşağıdaki formül ile belirlenir.

Genel ifadesi ile bir örnekleme boyu üzerindeki ortalama çizginin altında ve üstünde kalan düzensiz pürüzlülüklerin aritmetik ortalamasıdır.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$

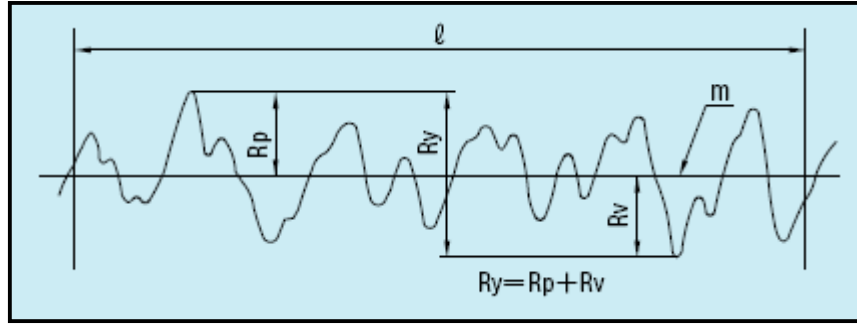


Şekil 5.2. Matematiksel Ortalama Pürüzlülük Grafiği (www.misumiusa.com, 2009)

5.1.2. Maksimum Profil Yüksekliği (R_y , R_t)

Matematiksel Ortalama Pürüzlülükte olduğu gibi malzeme üzerinde bir örnek uzunluk alınır. Tepeler ve vadiler ölçülür. Tepelerin ölçülmesinden sonra en üst noktadaki tepe ile vadilerin en dibindeki nokta arasındaki mesafe hesaplanır. Bu mesafe Maksimum Profil Yüksekliğidir.

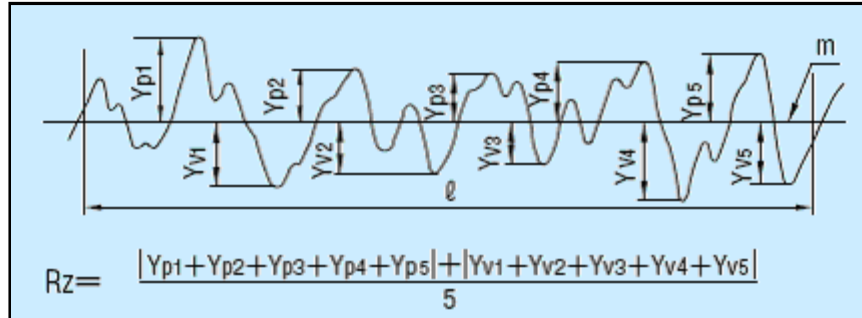
Ölçümde hataların önüne geçmek amacıyla parçanın yüzeyindeki derin çiziklerden kaçınmak gerekmektedir



Şekil 5.3. Maksimum Profil Pürüzlülüğü Grafiği (R_y , R_t) (www.misumiusa.com, 2009)

5.1.3. On Nokta Pürüzlülüğü (R_z)

Örnek olarak alınan bir uzunluk içerisinde tepelerin en yüksek olanının beş tanesi ile vadilerin en derin olanın beş tanesinin ortalamasının yükseklik farkı olarak hesaplanır. Bu birim mikron mertebesinde ifade edilir. Burada Y_{p1} , Y_{p2} , Y_{p3} , Y_{p4} , Y_{p5} , en yüksek beş tepeyi ve Y_{v1} , Y_{v2} , Y_{v3} , Y_{v4} , Y_{v5} en derin beş vadiyi ifade eder.



Şekil 5.4. On Nokta Pürüzlülüğü Grafiği (R_z) (www.misumiusa.com, 2009)

5.2. Yüzey Kalitesinin Üçgen ile İfadesi

Teknik resimlerde yüzey hassasiyeti için gösterilen $\sqrt{0.012}$ ifadesi R_a değerinin 0,012 μm olduğunu belirtmekte kullanılır.

Ters üçgen (▽) ile gösterim geleneksel bir gösterim şeklidir.

Aşağıda ters üçgen işaretleme yönteminin Ra, (Ry, Rt) ve Rz değerlerinin rakamsal karşılıkları gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Dört Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi

DÖRT ÜÇGEN (▽)	
(Ra)	0,012 ~ 0,2 µm
(Ry, Rt)	0,05 ~ 0,8 µm
(Rz)	0,05 ~ 0,8 µm

Çizelge 5.2. Üç Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi

ÜÇ ÜÇGEN (▽)	
(Ra)	0,4 ~ 1,6 µm
(Ry, Rt)	1,6 ~ 6,3 µm
(Rz)	1,6 ~ 6,3 µm

Çizelge 5.3. İki Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi

İKİ ÜÇGEN (▽)	
(Ra)	3,2 ~ 6,3 µm
(Ry, Rt)	12,5 ~ 25 µm
(Rz)	12,5 ~ 25 µm

Çizelge 5.4. Bir Üçgen Yüzey Pürüzlülük İfadesi

BİR ÜÇGEN (▽)	
(Ra)	12,5 ~ 25 µm
(Ry, Rt)	50 ~ 100 µm
(Rz)	50 ~ 100 µm

Çizelge 5.5. Üçgensiz Yüzey Pürüzlülük İfadesi (www.misumiusa.com, 2009)

ÜÇGENSİZ (~)	
(Ra)	50 ~ 100 µm
(Ry, Rt)	200 ~ 400 µm
(Rz)	200 ~ 400 µm

6. YAPILAN DENEYLER

ASJ ile yapılan kesme deneyleri esnasında;

a. 40 mm. kalınlığında BS 7191 355 EMZ ve 40 mm. kalınlığında ASTM A516 Gr.60 Çelik Malzemeleri kullanılmış,

b. Akış kesiti (Nozul Çapı) 1 mm., 1,1 mm, 1,2 mm, 1,3 mm, 1,4 mm ve 1.5 mm. olmak üzere beş kademeli kullanılmış,

c. Basınç 3300 Bar, 3350 Bar, 3400 Bar, 3450 Bar ve 3500 Bar olarak 50 birimlik artımlarla kademeli olarak artırılmış,

ç. Kesme hızı 20 mm/dak., 25 mm/dak ve 30 mm/dak. olmak üzere iki kademeli kullanılmıştır.

Her iki malzeme ile 90'ar kesim gerçekleştirilmiş ve toplam 180 adet kesim işlemi yapılmıştır.

6.1. Deneyde ASJ ile Kesilen Malzemeler

Deneyde BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 GR.60 çeliği malzemeler kullanılmıştır. Her iki malzeme orta dayanımda kullanılan malzemeler olarak tanımlanmaktadır (www.regencysteelasia.com). Yaygın ticari kullanım adı ASTM A516 GR.60 olan malzeme İngiliz standartlarında BS 1501 224 Gr. 430 malzemeye karşılık gelmektedir (www.mencinger.biz).

Güney Kore'de yapılan kesme deneyleri sırasında, imkanlar dahilinde her iki malzemenin tedarik edilebilmesinden dolayı deneyler bu iki malzeme ile yapılmıştır.

6.1.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği

Petrol platformları vb. sistemler için kullanılan çelikler su altındaki uygulamalar ve yerleşim yerlerine bağlı olmak üzere dağılım gösterir. Bugün su altındaki yapılarda kullanılan çeliklerin belirlenmesinde kullanılan gemicilik standartlarının yanı sıra dört tane daha farklı standart vardır. prEN10225, BS (İngiliz Standartları) 7191 ve NORSOK (Norveç Standartları) Avrupa'daki Kuzey Denizi'nde geçerli olan ana dokümanlardır. Standartlar birbirlerine yakınlık gösterdikçe üreticilerin daha ucuza çelik üretim olanakları artmaktadır.

6.1.1.1. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Kullanım Yerleri

İngiliz Çelik Standartlarında "Sabitlendirilmiş açık deniz yapılarındaki kaynak yapılabilen malzeme" olarak sınıflandırılan BS 7191 355 EMZ çeliği Avrupa Standartlarında EN10225 olarak sembolize edilmiştir. Anılan çelik tuzlu su ve basınç altında çalışan yapıları nedeniyle;

- Petrol platformları,
- Okyanus ve deniz altında nakil boru hatları ve
- Amfibik hava araçlarının tabanları vb. sistemlerde kullanılmaktadır.

6.1.1.2. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Fiziksel Özellikleri

Çizelge 6.1. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Fiziksel Özellikleri

BS 7191 355 EMZ ÇELİĞİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
En Düşük Çalışma Sıcaklığı	-55 °C
Minimum Akma Dayanımı	305-355 Mpa
Çekme Dayanımı	460-620 Mpa

6.1.1.2.BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Elemental Dağılımı

BS 7191 355 EMZ Çeliğinin içerisinde yer alan elementlerin dağılımı aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.2. BS 7191 355 EMZ Çeliğinin Elemental Dağılımı

BS 7191 ÇELİĞİ ELEMENTAL DAĞILIMI	
ELEMENT	Yüzde Oranı
Karbon (C)	0.15
Silisyum (Si)	0.25-0.55
Mangan (Mn)	1.00/1.65
Kükürt (S)	0.008
Fosfor (P)	0.02
Krom (Cr)	0.25
Molibden (Mo)	0.08
Niobyum (Nb)	0.04
Vanadyum (V)	0.01

Titanyum (Ti)	0.02
Nikel (Ni)	0.45
Bakır (Cu)	0.3
Aluminyum (Al)	0.05
Nitrojen (N)	0.01

6.1.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği

Karbon ve düşük sıcaklık servisleri için alaşım sınıfları - 45°C ve daha düşük sıcaklıklarda çalışan araçlarda, deniz vasıtaları ve diğer yapılar için yüksek mukavemet, süneklik, gevreklik sağlanması amacıyla gereklidir. -100°C civarındaki çalışma şartları için birçok çelik üzerinde mühendislik çalışması yapıldığı, uygun malzemeyi seçmek için her bir alaşım sınıfı için mekanik özellikleri bilinmeli ve uygulamaları anlaşılmalıdır. Düşük sıcaklıklarda çalışan sistem ya da ekipmanların tasarımları yapılırken çentik tokluğunun önem sırasında yukarılarda olduğu tespit edilmelidir. Bir parça ya da yapı genellikle çentik ya da stres yoğunlaşmasından dolayı hata verebilir. Karbon çelikleri düşük termal iletkenlikleri nedeniyle alaşım çeliklerine nazaran daha iyi bir kaynak yapılabilirliğe, daha büyük tokluk değerlerine ve daha yüksek mukavemete sahiptirler. 586 Mpa olan dayanımlarıyla 516 çelikleri karbon çelikleri içerisinde en sık kullanılanlarından birisidir. 516 Çeliklerinin en büyük avantajları düşük maliyetli olmalarıdır.

6.1.2.1. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Kullanım Yerleri

ASTM A516 Gr.60 çeliği kullanım yeri itibarıyla BS 7191 355 EMZ ile benzerlikler göstermekle beraber deniz üstü gemi vb. deniz taşıma araçlarında daha çok tercih edilmektedir. ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemenin BS 7191 355 EMZ çeliği malzeme ile kıyaslandığında daha ucuza mal edilebildiği görülür.

BS 7191 355 EMZ ile benzerlik göstererek ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemededir;

- Petrol platformları,
- Okyanus ve deniz altında nakil boru hatları ve
- Amfibik hava araçlarının tabanları vb. sistemlerde kullanılmaktadır. Ancak deniz üstü araçları ve deniz uçaklarının suyla temas eden float'larının imalatlarında daha çok tercih edilmektedir.

6.1.2.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Fiziksel Özellikleri

ASTM A516 Gr.60 çeliği -45 °C ye kadar sıcaklıklarda fiziksel özelliklerini koruyabilen bir malzemedir. Erdemir A.Ş. kataloğunda 6860 kalite numarası ile verilen malzeme “Orta ve Düşük Sıcaklıklarda Basınçlı Kullanıma Uygun Sıcak Haddelenmiş Karbon Çelikleri” kategorisinde yer almaktadır. American Iron and Steel Institute (AISI) standartlarında AISI 1330 olarak dönüştürülen malzemenin fiziksel özelliklerini içeren tablo aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 6.3. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Fiziksel Özellikleri

ASTM A516 Gr.60 EMZ ÇELİĞİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
En Düşük Çalışma Sıcaklığı	-45 °C
Minimum Akma Dayanımı	221 Mpa
Çekme Dayanımı	414 – 496 Mpa

6.1.2.3. ASTM A516 Gr.60 EMZ Çeliğinin Elemental Dağılımı

ASTM A516 Gr.60 Çeliğinde yer alan elementlerin dağılımı aşağıda verilmiştir.

Çizelge 6.4. ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Elemental Dağılımı

ASTM A516 Gr.60 ÇELİĞİ ELEMENTAL DAĞILIMI	
ELEMENT	Yüzde Oranı
Karbon (C)	0.23
Krom (Cr)	0.3
Nikel (Ni)	0.3
Silisyum (Si)	0.15-0.4
Mangan (Mn)	0.60-0.90
Kükürt (S)	0.035

6.2. Deneyin Yapılışı

Güney Kore’de Changwon Şehri’nde bulunan Changwon Water Jet Co.Ltd.’de fabrikanın sahibi Mak.Müh.Jin,Young-Choul koordinasyonunda kesme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. (Fabrikanın resmi sitesine internet üzerinden www.cwwaterjet.com adresinden ulaşmak mümkündür.)

Çizelge 6.5. Kesim İşlem Basamakları ve Değişen Parametreler

Çap (mm)	İlerleme Hızı (mm/dak.)	Basınç (Bar)
1	20	3300
1	25	3300

1	30	3300
1	20	3350
1	25	3350
1	30	3350
1	20	3400
1	25	3400
1	30	3400
1	20	3450
1	25	3450
1	30	3450
1	20	3500
1	25	3500
1	30	3500
1,1	20	3300
1,1	25	3300
1,1	30	3300
1,1	20	3350
1,1	25	3350
1,1	30	3350
1,1	20	3400
1,1	25	3400
1,1	30	3400
1,1	20	3450
1,1	25	3450
1,1	30	3450
1,1	20	3500
1,1	25	3500
1,1	30	3500
1,2	20	3300
1,2	25	3300
1,2	30	3300
1,2	20	3350
1,2	25	3350
1,2	30	3350
1,2	20	3400
1,2	25	3400
1,2	30	3400
1,2	20	3450
1,2	25	3450
1,2	30	3450
1,2	20	3500
1,2	25	3500

1,2	30	3500
1,3	20	3300
1,3	25	3300
1,3	30	3300
1,3	20	3350
1,3	25	3350
1,3	30	3350
1,3	20	3400
1,3	25	3400
1,3	30	3400
1,3	20	3450
1,3	25	3450
1,3	30	3450
1,3	20	3500
1,3	25	3500
1,3	30	3500
1,4	20	3300
1,4	25	3300
1,4	30	3300
1,4	20	3350
1,4	25	3350
1,4	30	3350
1,4	20	3400
1,4	25	3400
1,4	30	3400
1,4	20	3450
1,4	25	3450
1,4	30	3450
1,4	20	3500
1,4	25	3500
1,4	30	3500
1,5	20	3300
1,5	25	3300
1,5	30	3300
1,5	20	3350
1,5	25	3350
1,5	30	3350
1,5	20	3400
1,5	25	3400
1,5	30	3400
1,5	20	3450
1,5	25	3450

1,5	30	3450
1,5	20	3500
1,5	25	3500
1,5	30	3500

Her iki malzeme ile 90 adetlik kesim gerçekleştirilmiş ve toplam 180 adet kesim işlemi yapılmıştır. Kesilen şeritlerin yüzey kalitesinin belirlenmesi ve makro fotoğraflarının çekilmesi Gumi City'deki Kumoh National Institute of Technology laboratuvarlarında yapılmıştır. (www.kumoh.ac.kr).



Şekil 6.1. Güney Kore'de Deney Sırasında Malzeme Kesimi

6.2.1. Güney Kore'de Kesme Deneyinin Yapıldığı Fabrikanın Tanıtımı

Water Jet Co.Ltd. fabrika Güney Kore'nin sanayii şehri olan Changwon'da kuruludur. Kesme deneyleri fabrikanın sahibi olan Mak.Müh. Jin,Young-Choul koordinasyonunda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Güney Kore’de Malzeme Kesimi Sonrası İnceleme

6.2.2. Deneyde Kullanılan Malzemelerin Hazırlanması

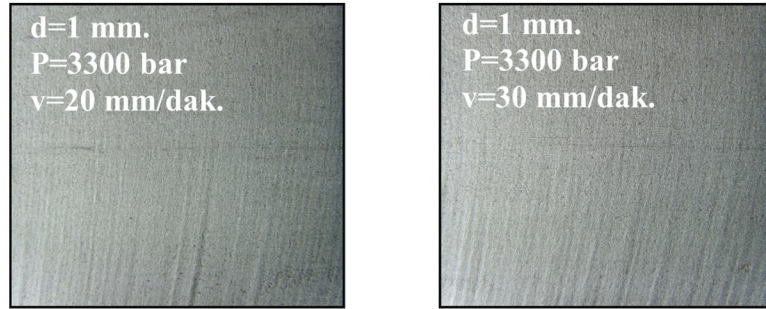
Aşağıda verilen şekillerde olduğu gibi BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Çeliklerinin kesimlerinde uygulanacak olan basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapı değerlerinin değişimlerine göre ön hazırlık yapılmıştır. Daha sonra belirlenen basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapı değerleriyle kesim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 180 adet kesim yapılmıştır.

6.2.3. Kesme Sonrası Yüzey Analizleri

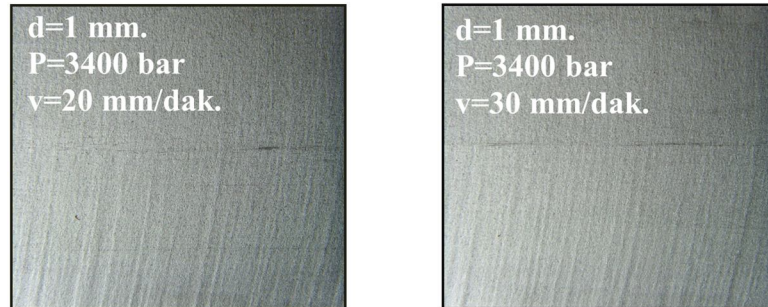
Belirlenen kesim parametrelerine bağlı kalarak yapılan kesimlerden sonra şeritlerin yüzeylerinin analiz işlemleri yapılmıştır. Yüzey analizlerinin en önemli girdilerinden olan makro fotoğraflar sayesinde yüzey kalitesi hakkında bilgi edinmek mümkün olmaktadır.

6.2.3.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği ile Kesim İşlemi

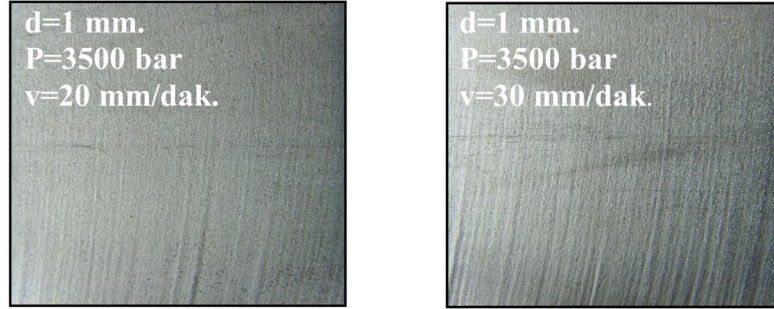
Endüstride oldukça geniş bir kullanım alanı olan BS 7191 355 EMZ Çeliği ile yapılan kesim işlemlerinden sonra yüzey değerlendirmesine yönelik makro fotoğrafların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.



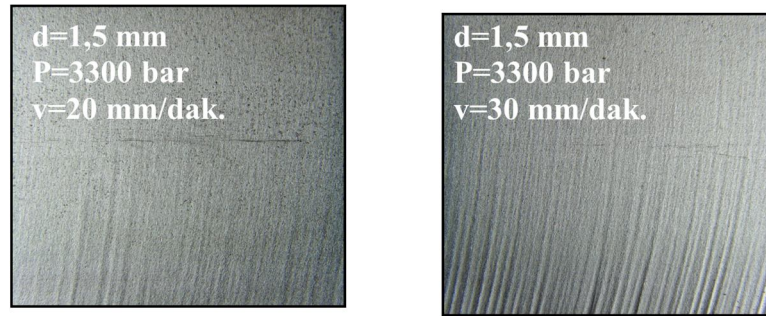
Şekil 6.3. d=1 mm, P=3300 bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



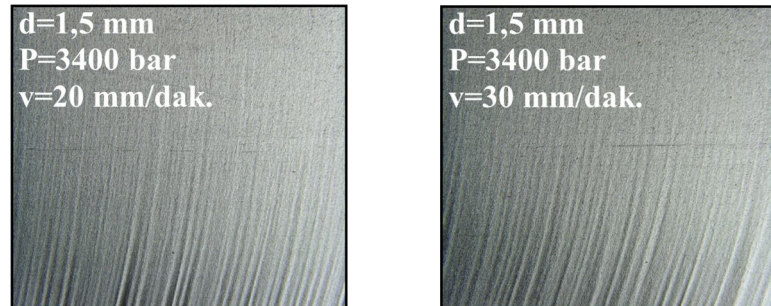
Şekil 6.4. d=1 mm, P=3400 bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



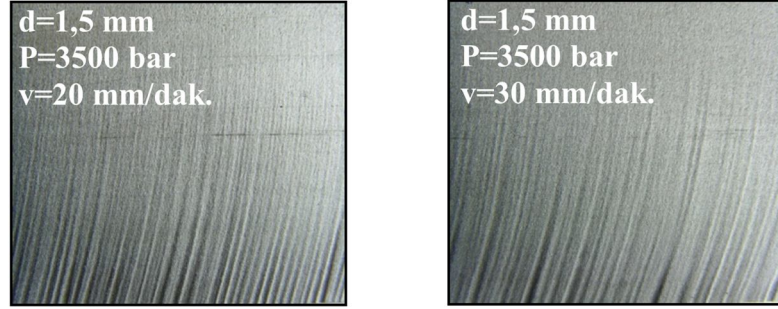
Şekil 6.5. $d=1$ mm, $P=3500$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



Şekil 6.6. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



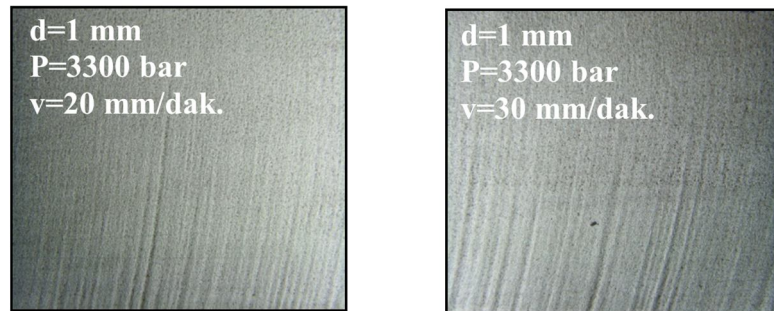
Şekil 6.7. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



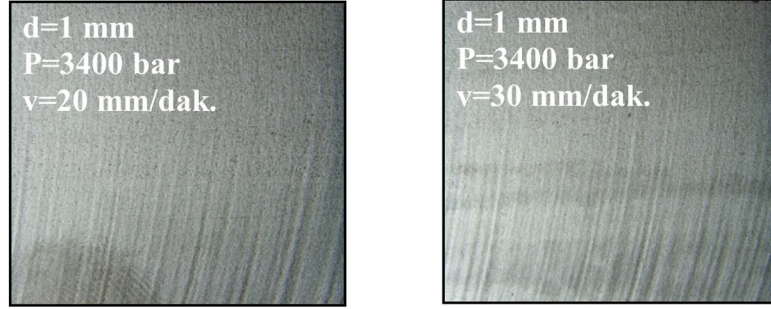
Şekil 6.8. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.

6.2.3.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği ile Kesim İşlemi

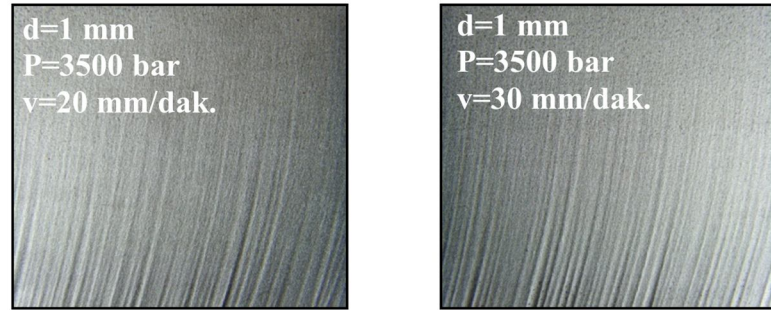
Özellikle soğuk bölgelerdeki petrol platformları ve taşıma hatlarında kullanım alanına sahip olan ASTM A516 Gr.60 Çeliği ile yapılan kesim işlemlerinden sonra yüzey değerlendirmesine yönelik makro fotoğrafların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.



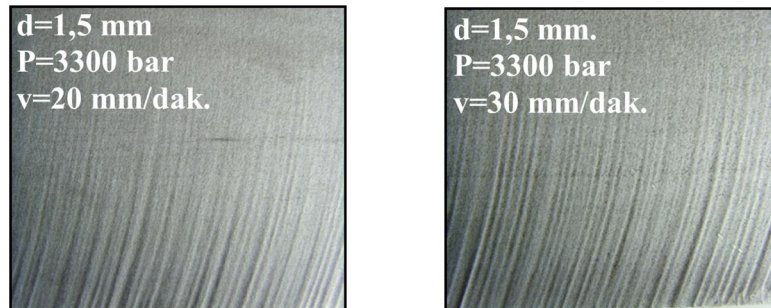
Şekil 6.9. $d=1$ mm, $P=3300$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



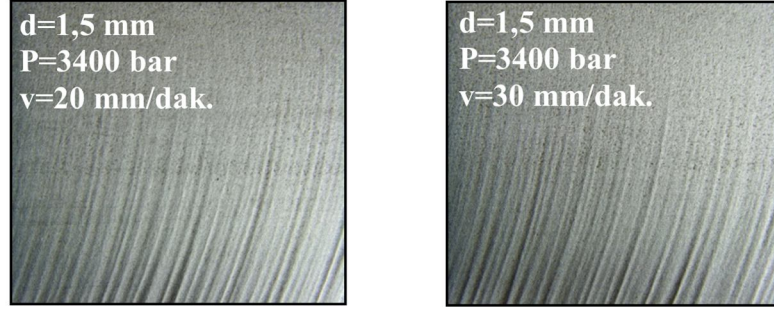
Şekil 6.10. $d=1$ mm, $P=3400$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



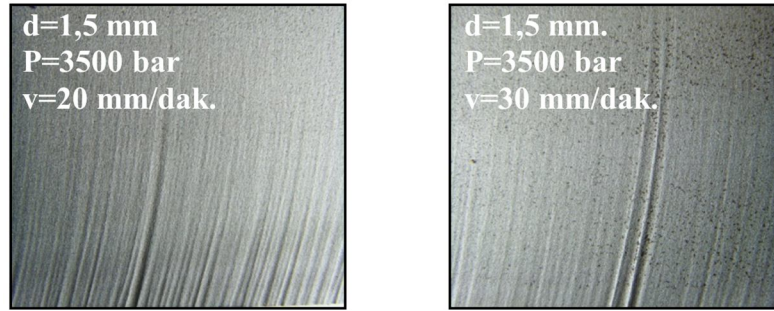
Şekil 6.11. $d=1$ mm, $P=3500$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



Şekil 6.12. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



Şekil 6.13. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.



Şekil 6.14. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar basınçta ilerleme değişimine bağlı yüzey kalitesi farklılığını gösteren makro fotoğraf.

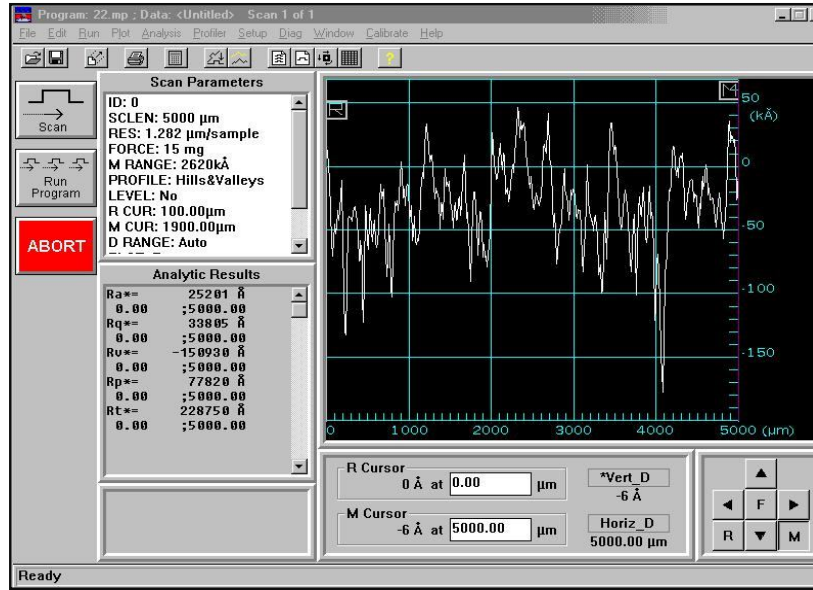
6.3. Kesilen Malzemelerin Yüzey Kalitesi Analizleri

BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Çeliği malzemeleri ile basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapının değiştirilmesi ile yapılan 180 adet kesim işleminden sonra gerçekleştirilen yüzey kalitesi analizleri aşağıda sunulmuştur.

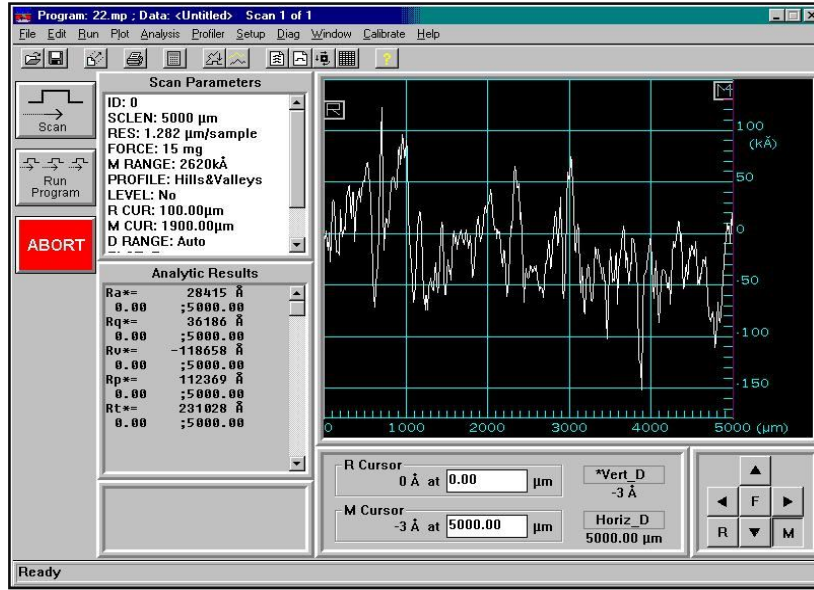
Makro çekimle yüzey analizi konusunda bilgi vermekte ancak çoğu zaman yalnız başına yeterli olmamaktadır. Bu nedenle yüzey kalitesinin belirlenmesi amacıyla analiz çalışması yapılmıştır.

6.3.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği Yüzey Kalitesi Analizi

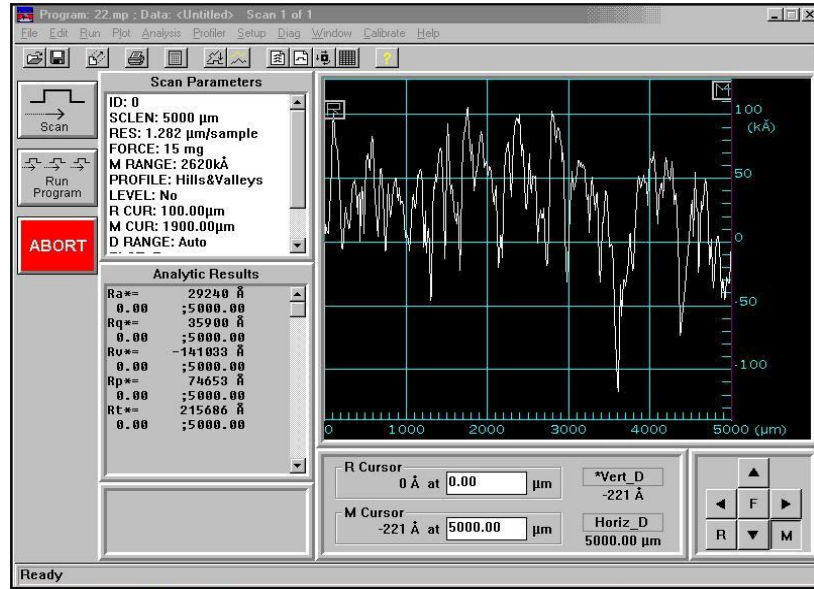
BS 7191 355 EMZ Çeliği malzemesine yönelik yüzey kalitesi analizleri aşağıda sunulmuştur. Yüzey analizinin yapılmasına yönelik ölçüm 40 mm kalınlığındaki malzemenin üstten 5 mm aşağıdaki yatay düzlemi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey analiz grafiklerinin bir kısmı aşağıda verilmiştir.



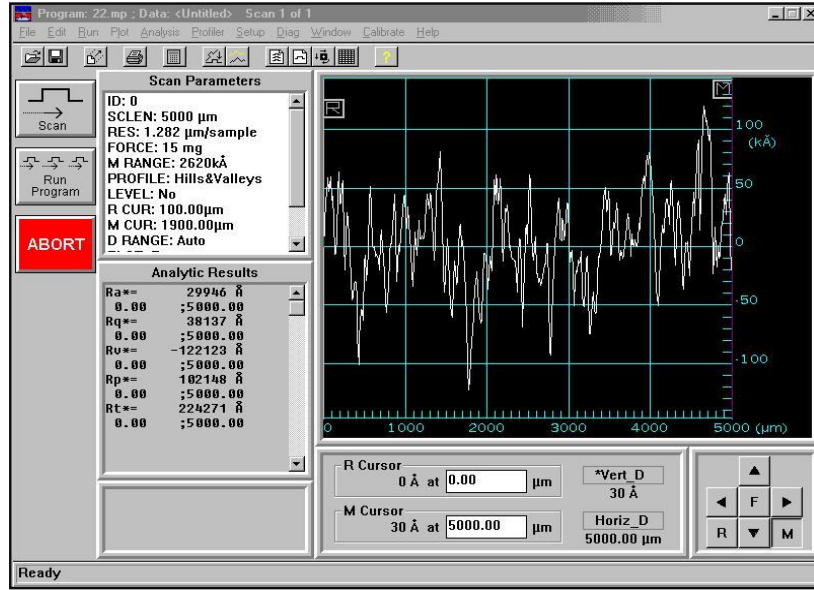
Şekil 6.15. d=1 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafği



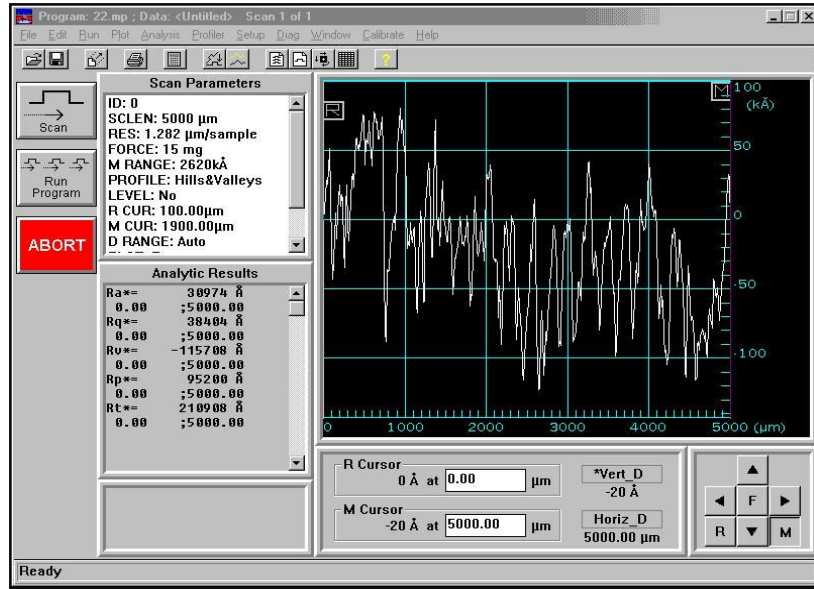
Şekil 6.16. $d=1$ mm, $P=3300$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



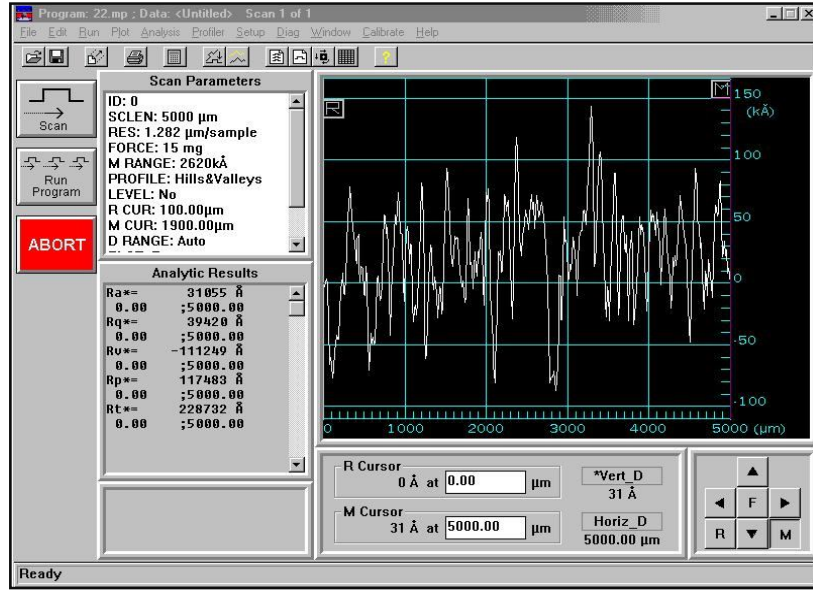
Şekil 6.17. $d=1$ mm, $P=3400$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



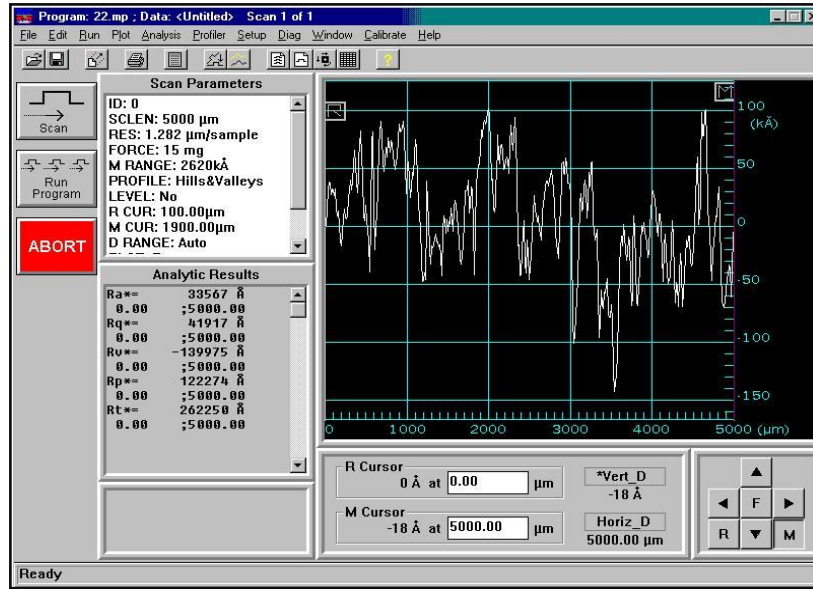
Şekil 6.18. $d=1$ mm, $P=3400$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



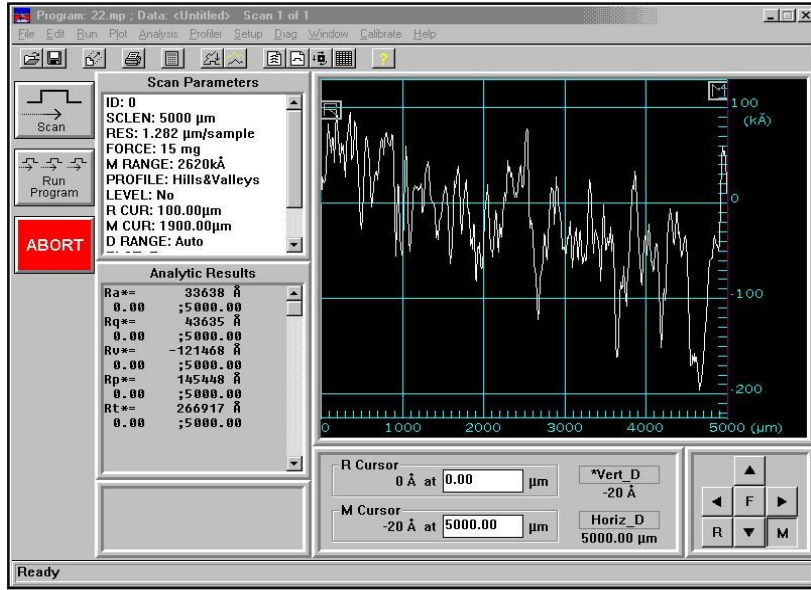
Şekil 6.19. $d=1$ mm, $P=3500$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



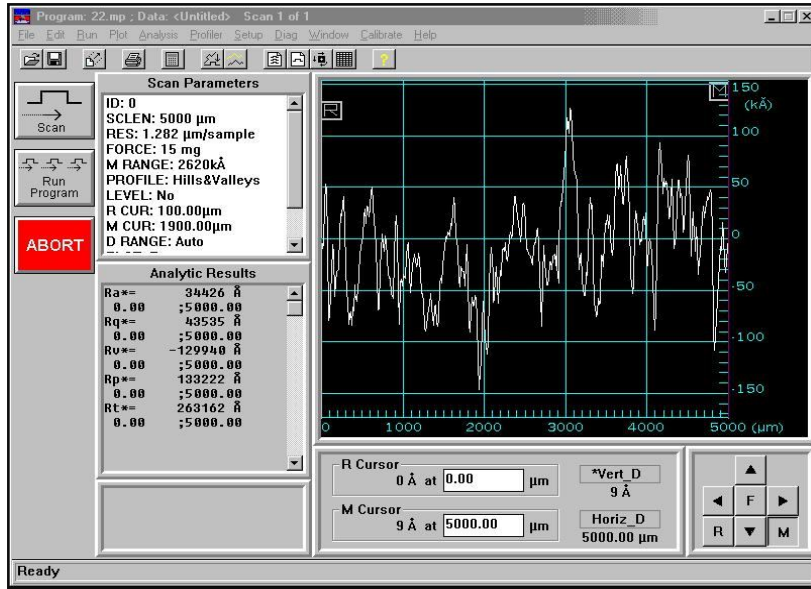
Şekil 6.20. $d=1$ mm, $P=3500$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



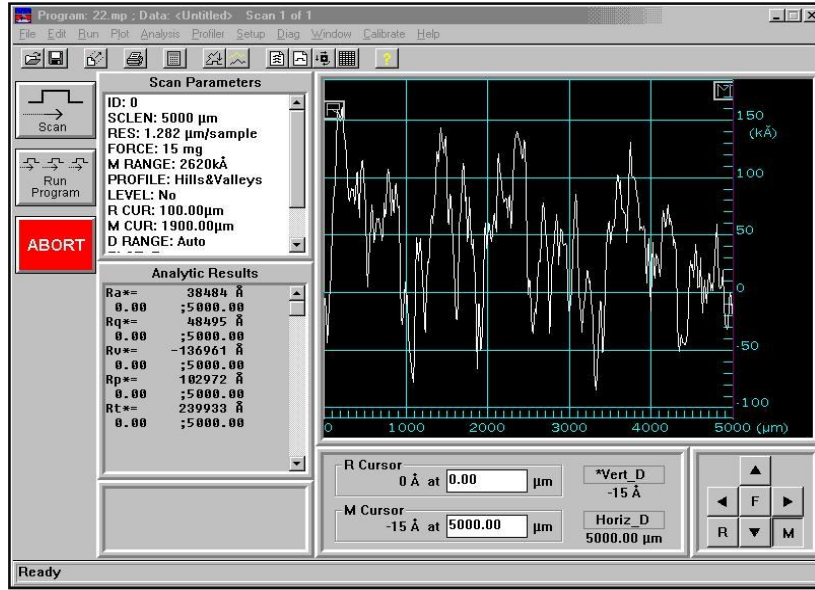
Şekil 6.21. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



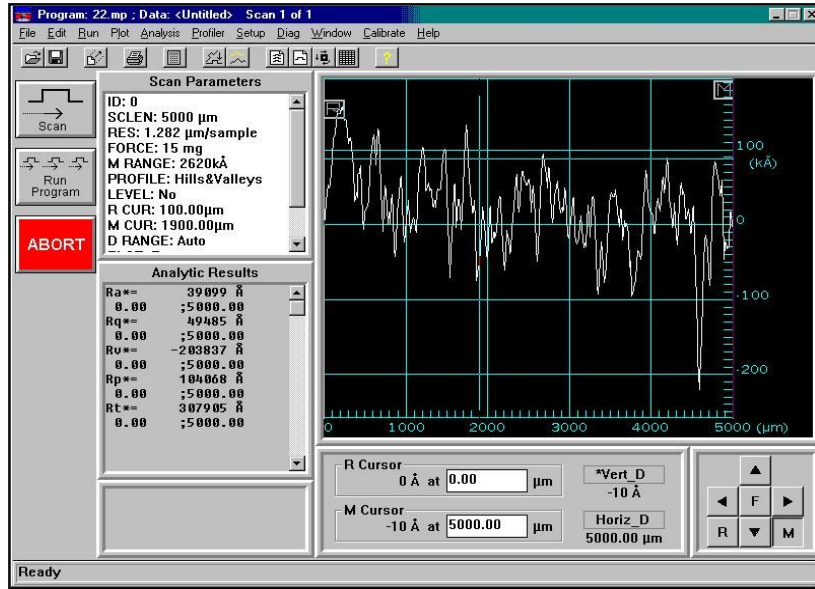
Şekil 6.22. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



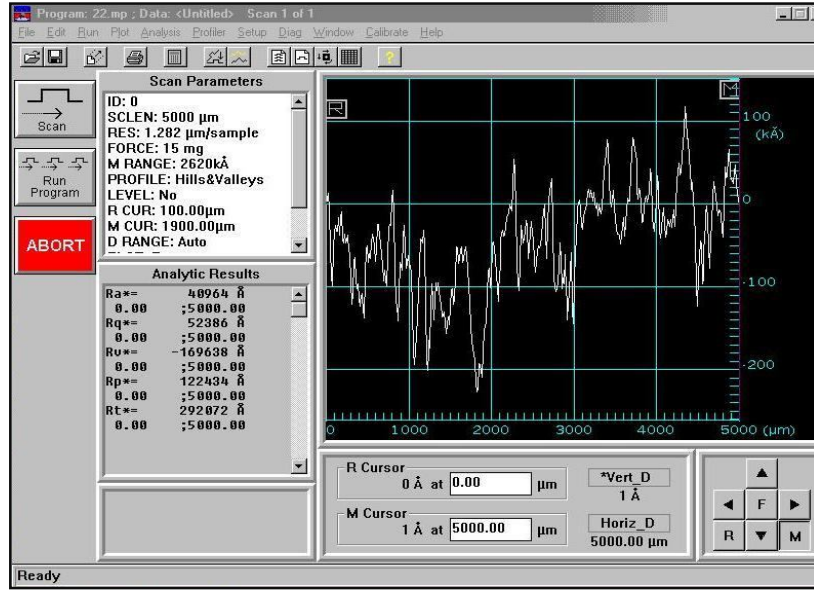
Şekil 6.23. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



Şekil 6.24. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



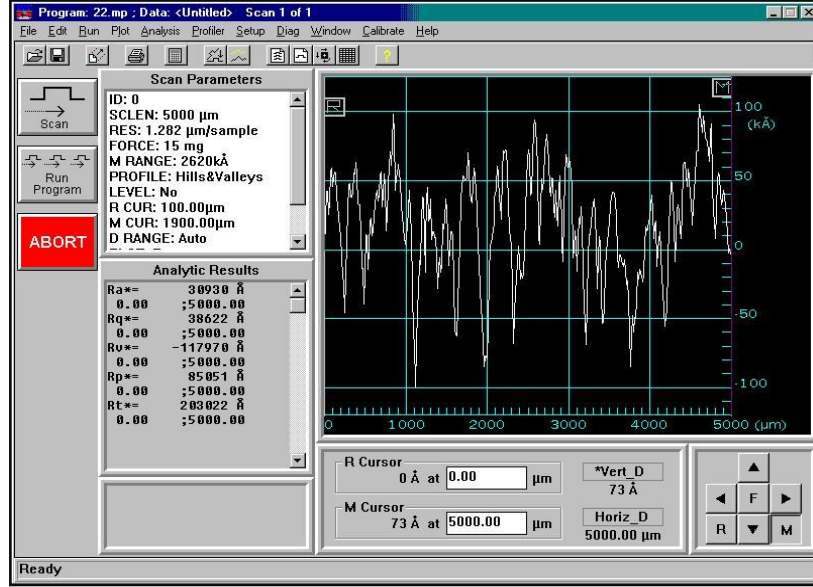
Şekil 6.25. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



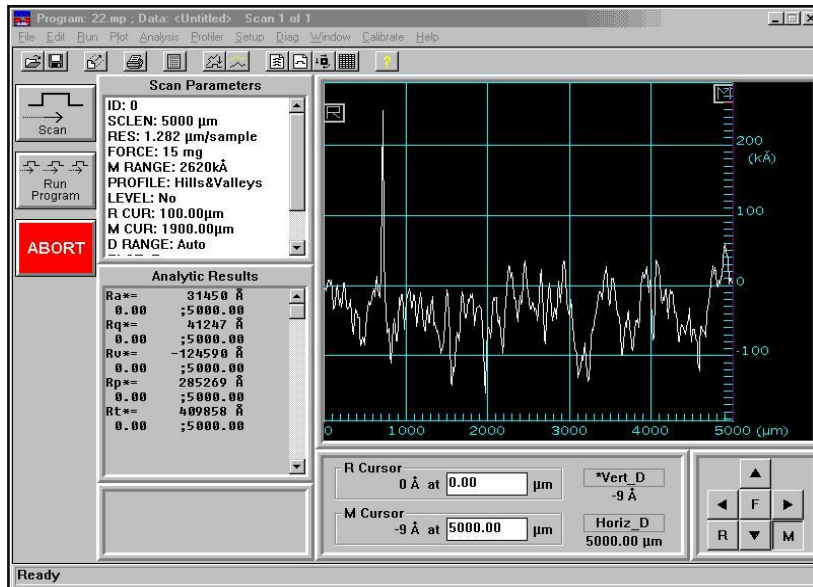
Şekil 6.26. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği

6.2.2. ASTM A516 Gr.60 ÇELİĞİ YÜZEY KALİTESİ ANALİZİ

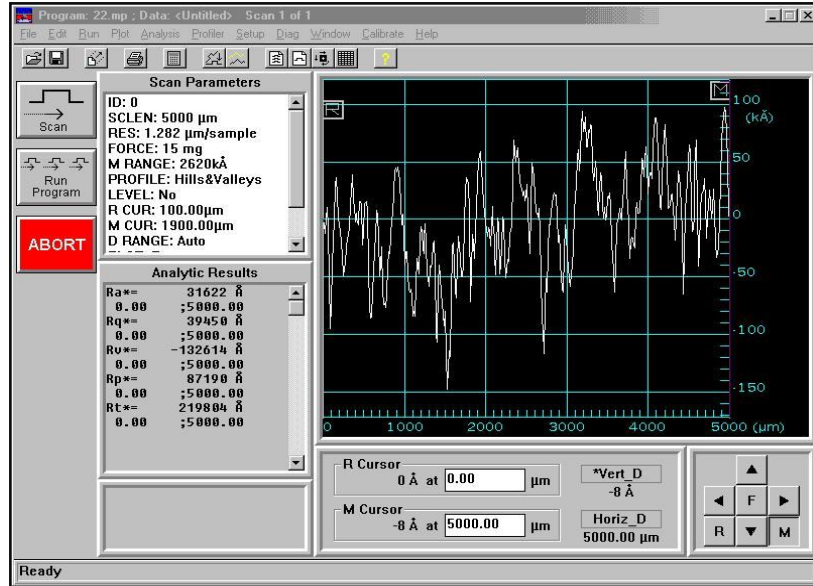
ASTM A516 Gr.60 Çeliği malzemesi yüzey kalitesi analizlerinin bir kısmı aşağıda verilmiştir.



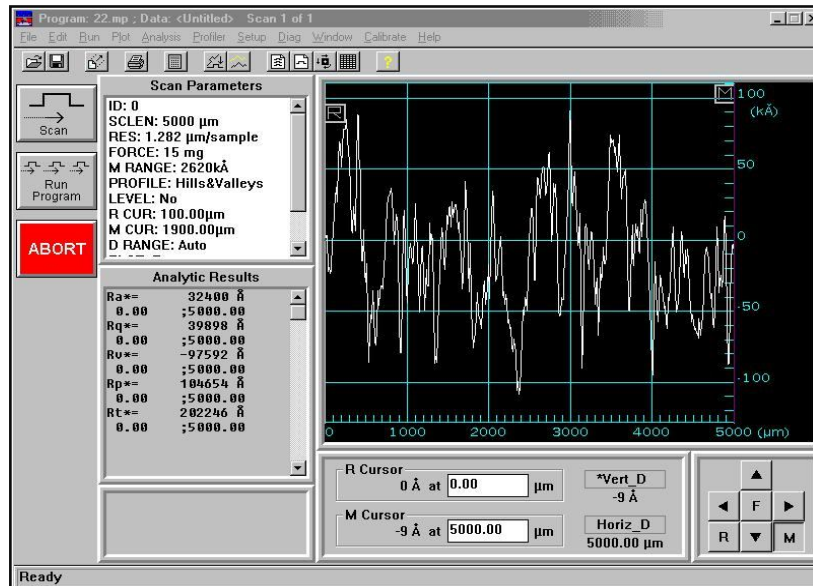
Şekil 6.27. d=1 mm, P=3300 bar, v=20 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



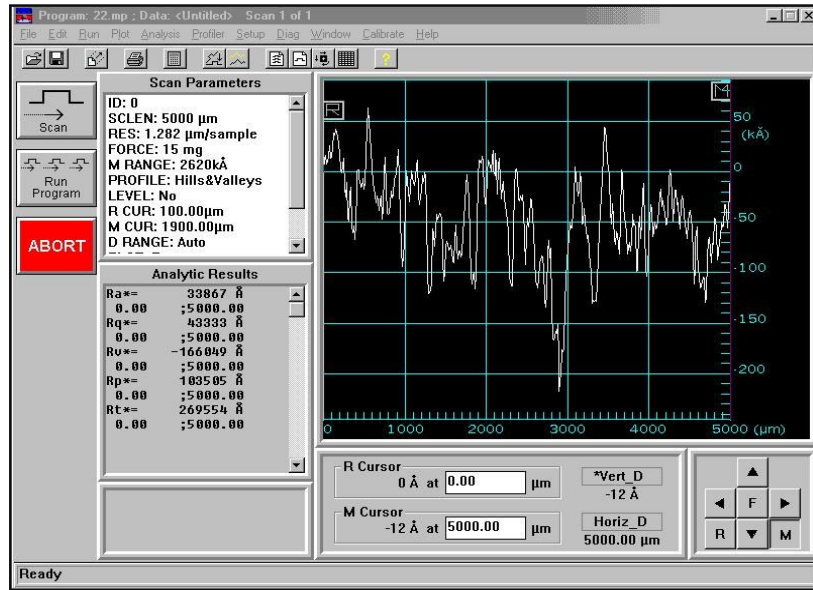
Şekil 6.28. d=1 mm, P=3300 bar, v=30 mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



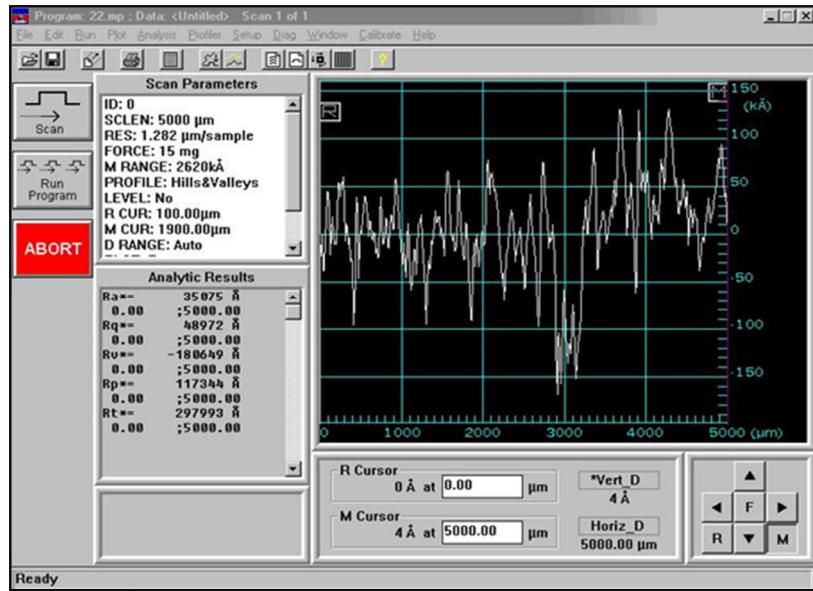
Şekil 6.29. $d=1$ mm, $P=3400$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



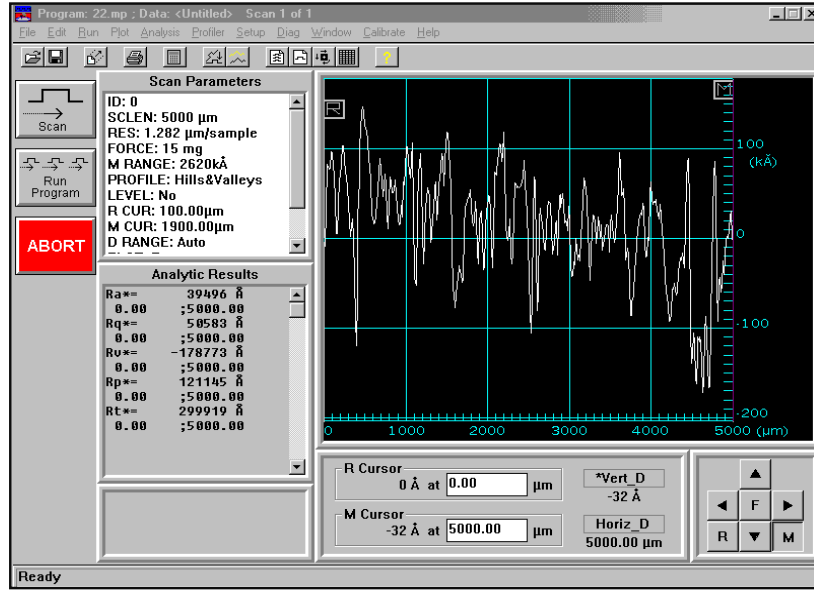
Şekil 6.30. $d=1$ mm, $P=3400$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



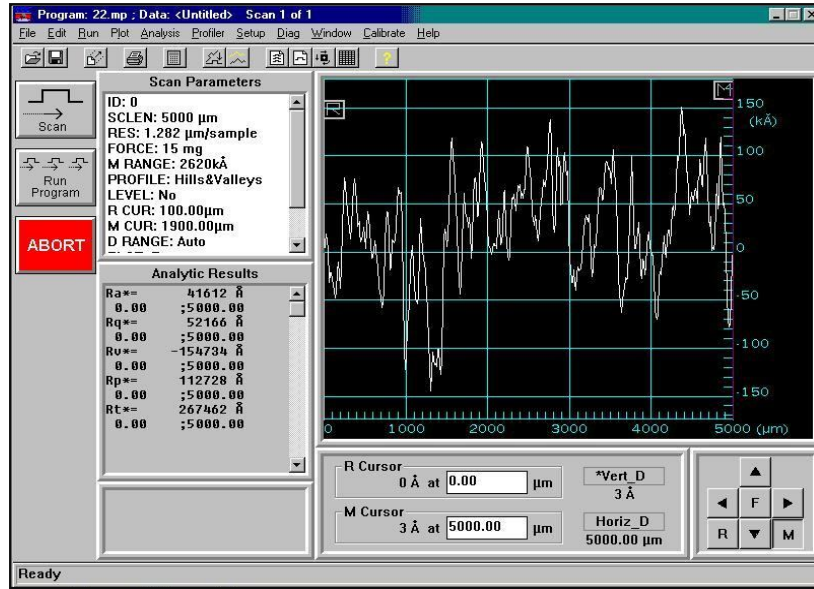
Şekil 6.31. $d=1$ mm, $P=3500$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



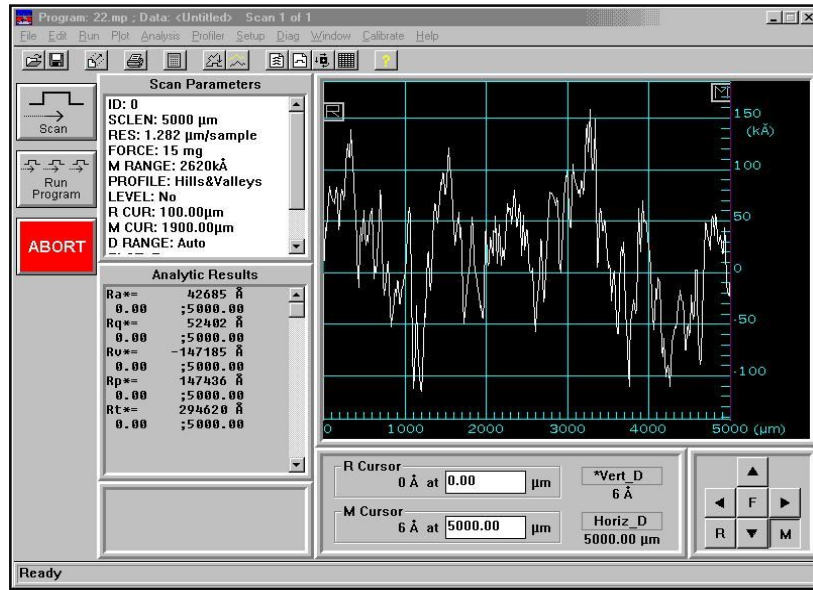
Şekil 6.32. $d=1$ mm, $P=3500$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



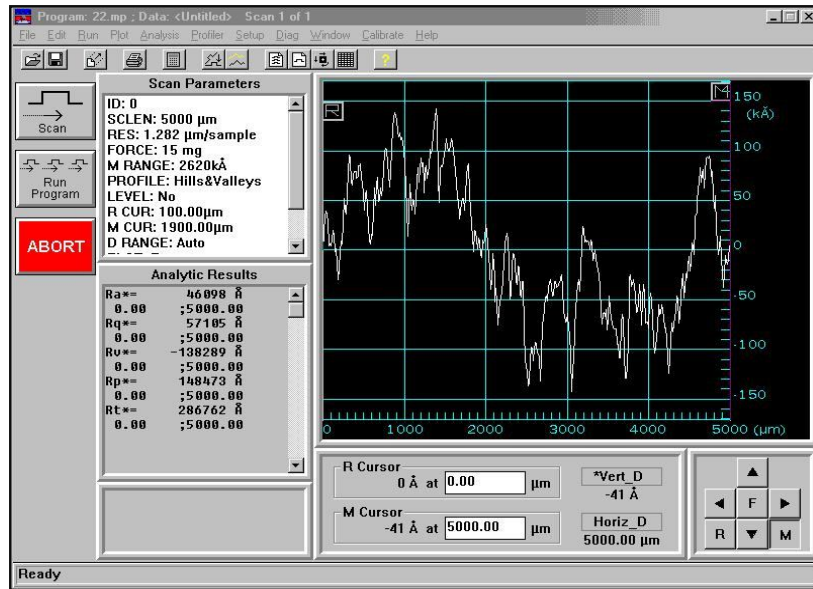
Şekil 6.33. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



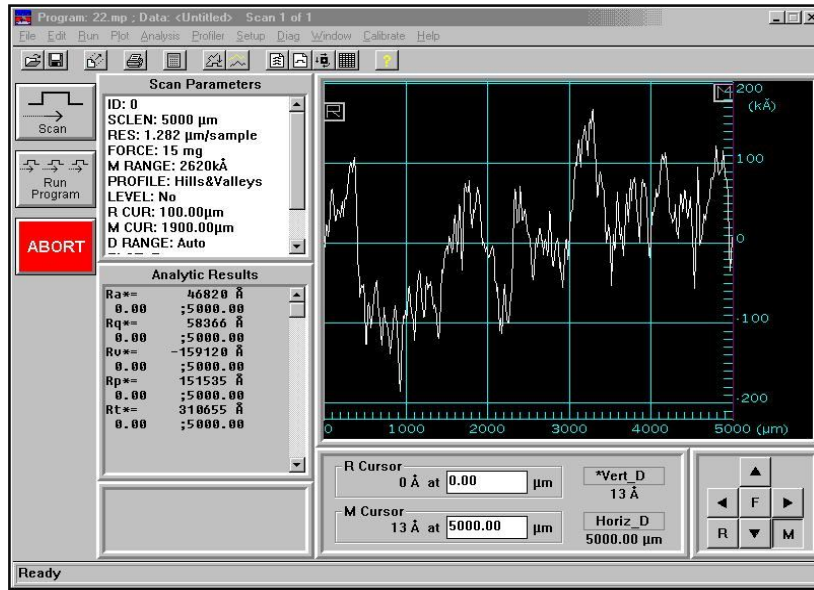
Şekil 6.34. $d=1,5$ mm, $P=3300$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



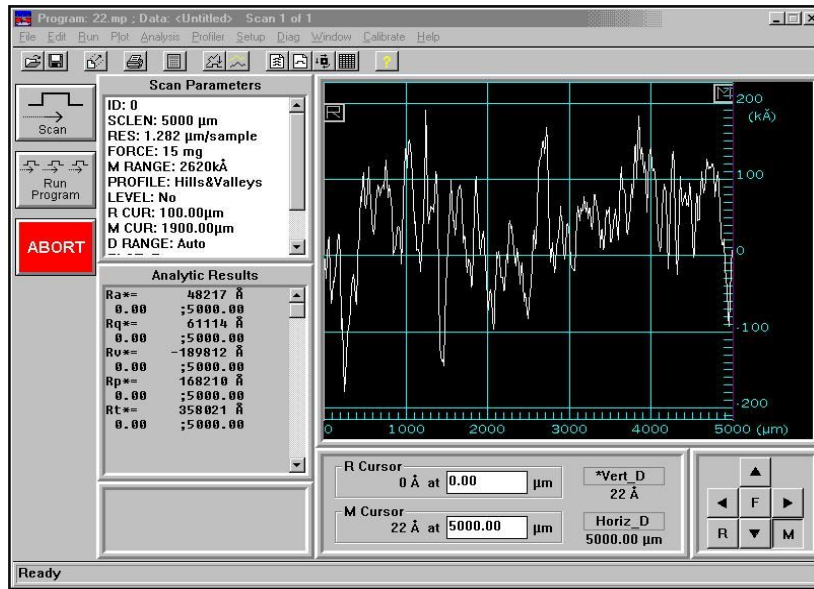
Şekil 6.35. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



Şekil 6.36. $d=1,5$ mm, $P=3400$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



Şekil 6.37. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar, $v=20$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği



Şekil 6.38. $d=1,5$ mm, $P=3500$ bar, $v=30$ mm/dak. Yüzey Analiz Grafiği

7. MATERYAL VE METOT

7.1. Giriş

Bu çalışmada Güney Kore'de Changwon Şehri'nde bulunan Changwon Water Jet Co.Ltd. tesislerinde ana kullanım yeri deniz uçakları ve okyanus tabanından geçen borularda kullanılan çeliklerden olan BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemeleriyle basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapı değiştirilerek kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Toplam 180 adet kesim işleminin gerçekleştirildiği deneylerde malzeme türünün, basıncın, kesme hızının ve su jeti çapının yüzey kalitesine etkisi ele alınmıştır. Daha sonra Gumi City'de kurulu olan Kumoh National Institute of Technology'deki malzeme ve metalurji laboratuvarında kesilen kuponların üzerinde makro fotoğraf çekimleri ve yüzey kalitesi analiz grafikleri elde edilmiştir. Sonuçta ileriki yıllarda su jeti ile kaliteli yüzeyi elde etmek amacıyla yapılacak deneyler ve sanayide gerçekleştirilen kesme işlemlerine ışık tutması amacıyla basınç, kesme hızı ve su jeti çapının kesme yüzey kalitesine etkisi analiz edilerek önerilerde bulunulmuştur.

7.2. Yöntem

Teknolojide oldukça geniş bir kullanım alanı olan aşındırıcılı su jeti ile yapılan kesme işlemi sonrasında yüzey kalitesinin istenilen seviyede olması malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapına bağlı olduğu değerlendirilmektedir. Bu nedenle Güney Kore'de Changwon Şehri'nde bulunan Changwon Water Jet Co.Ltd. tesislerinde yapılan kesme deneylerinde;

a. 40 mm. Kalınlığında BS 7191 355 EMZ ve 40 mm. kalınlığında ASTM A516 Gr.60 Çelik Malzemeleri kullanılmış,

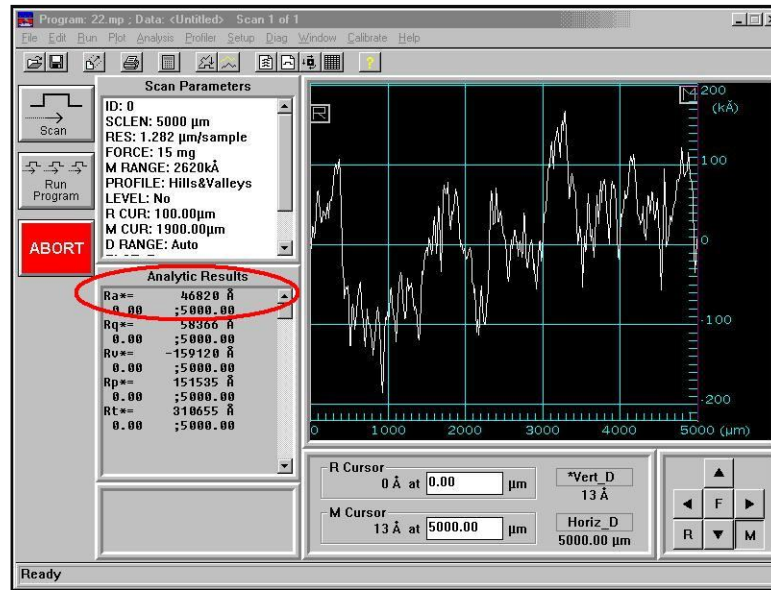
b. Kesici su jeti çapı 1 mm, 1,1 mm, 1,2 mm, 1,3 mm, 1,4 mm ve 1.5 mm olmak üzere beş kademeli kullanılmış,

c. Basınç 3300 Bar, 3350 Bar, 3400 Bar, 3450 Bar ve 3500 Bar olarak 50 birimlik artımlarla kademeli olarak artırılmış,

ç. Kesme hızı 20 mm/dak., 25 mm/dak ve 30 mm/dak. olmak üzere üç kademeli kullanılmıştır.

Kesme yapılmasının yüzey kalitesinin değerlendirilmesine yönelik olarak Gumi City’de kurulu olan Kumoh National Institute of Technology’deki malzeme ve metalurji laboratuvarında kesilen şeritlerin üzerinde makro fotoğraf çekimleri ve yüzey kalitesi analiz grafikleri elde edilmiştir.

Anılan yüzey kalitesi grafiklerinde en önemli veriyi sağlayacak olan matematiksel ortalama pürüzlülük (R_a) değerleri kullanılması suretiyle bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. R_a değeri bu çalışmada olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi vermek amacıyla kullanılan bir değer olup genel itibariyle yüzey hassasiyetini değerlendirmede yeterli veriyi sağlamaktadır.



Şekil 7.1. Matematiksel Ortalama Pürüzlülük (R_a) değerinin gösterilmesi.

Optimizasyon çalışması neticesinde ise 40 mm BS 7191 355 EMZ ve 40 mm kalınlığında ASTM A516 Gr.60 Çelik Malzemelerin kıyaslanması sağlanmış ve basınç, ilerleme hızı ve su jeti çapına bağlı olarak en uygun kesmenin hangi basamakta gerçekleştirildiği belirlenmiştir.

7.3. Malzeme Türünün Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi

ASJ ile kesme uygulamaları yaygınlaştıkça, yapılan araştırmalar kesme işlemi ile yüzey kalitesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. ASJ ile kesilen malzemede kesme işlemi, jet içerisine dahil olan aşındırıcı taneciklerin çarpma etkisi ile meydana gelen erozyon mekanizmasından ibarettir. Sünek malzemelerle yapılan çalışmalar erozyon işleminin, kesme aşınma mekanizması ve deformasyon aşınma mekanizmasını içerdiğini göstermektedir. Yüzeydeki iki farklı özellik, lazer, plazma veya ASJ ile kesme gibi jet ile kesme işlemlerinin hepsinde söz konusu olmaktadır. Bu işlemlerde jet içermiş olduğu enerjinin önemli bir kısmını kaybetmediği bölgede düzgün bir yüzey vermektedir. Bir sonraki aşamada jet, sapmaya uğramakta ve malzemeye çarpma açısı büyümektedir. Bunun doğal bir sonucu olarak kesme mekanizması değişmektedir. ASJ ile sünek malzemelerin kesilmesinde bu değişim, malzemedeki atomik sınırların kesilmesinden, deformasyon kesilmesine dönüşüm şeklinde görülmektedir (Külekcı ve Akkurt, 2001).

7.4. Basıncın Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Yapılan çalışmalarda düşük basınç değerlerinde de kaliteli yüzey elde edilmesinin mümkün olduğu görülmektedir. Düşük basınçlarda daha iyi yüzey kalitesinin elde edilmesi ilk başta pek uygun olmayan bir durum gibi gelebilir, ancak elde edilen yüzey kalitesi, aşındırma tanecik hızı ve birim alana çarpan tanecik çapı gibi parametrelere de bağlıdır. Düşük hıza sahip partiküller yüzeyde daha az hasar meydana getireceklerdir. Fakat enerjilerini oldukça hızlı bir şekilde kaybettiklerinden kesme aşınma bölgesi deformasyon aşınma bölgesine nazaran artmış olacaktır. Buna ilave olarak bir hedefe

yönlendirilen partiküllerden bir kısmı malzemeden parçacıklar koparırken geriden gelen diğerleri yüzeyin bitirme işlemini gerçekleştirir (Külekçi ve Akkurt, 2001).

7.5. Kesme Hızının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisinin Analizi

Kesme hızı, arzu edilen yüzey kalitesinin elde edilmesinde en önemli faktörlerden birisidir. Özellikle kesme aşınma bölgesinin arttırılmasında etkili olduğu değerlendirilmektedir. Daha düşük hızlarda kesim alanında birim başına düşen partikül miktarı artmaktadır. Bu ise daha önce kesimi yapılan bölgede yüzey kalitesinin artmasına katkı sağlayacak olan ikincil işlemin gerçekleştirilmesi anlamını taşımaktadır. Düşük hız yüzey kalitesini artırmakta ancak diğer yandan da kesme işlemi süresinin uzamasına neden olmaktadır. Kesme hızı parametresinin belirlenmesi istenilen yüzey kalitesi ve maliyet-etkinlik değerlendirmesi açısından önemlidir. Yapılan deneylerde kesme hızları 20 mm/dak., 25 mm/dak. ve 30 mm/dak. olarak ayarlanmıştır.

7.6. Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesine Etkisi

Orifis kesme işlemi için uygun olan jeti meydana getirmek amacıyla kullanılan yuvarlak ve keskin uçlu bir makine elemanıdır. Düzgün olarak ayarlanmış bir kesme kafasında ince bir su jeti nozulun içerisinden geçirilerek hedef malzemeye yönlendirilir.

Yüksek bir kalite ve kesme oranı elde etmek için iyi bir akış huzmesi gereksinimi mevcuttur. İyi orifis nozulun ucunda istenilen çapta bir lüle elde edilmesini sağlar. Düşük kalitedeki yıpranmış orifisler uygun olmayan dağınık bir jet yaratacaktır. Orifisin yıpranmasının nedeni düşük su kalitesi, çapak oluşumları ya da su kirlenmesinden olmaktadır. Bozulmuş ya da hassasiyetini yitirmiş bir hatalı bir orifis parçaların da bozulmasına yol açabilmektedir. Düşük kalitede parça imalatının önüne geçmek amacıyla operatörün sık sık jet kalitesini incelemesi ve gerekirse orifisi değiştirmesi önem arz etmektedir. Pahalı olmayan orifisler genellikle yapay safir ya da yakuttan imal edilmekte ve çalışma şartlarına bağlı olarak 10 ile 100 saatleri arasında

kullanılmaktadır ancak bahse konu orifislerin hatalı parça imalatlarına neden olabileceği değerlendirilmektedir. Bu tarz orifisler dikkatle izlenmeli ve ihtiyaç duyulduğu anda ivedilikle değiştirilmelidir. Elmastan yapılmış olan orifislerin daha üstün yıpranma zamanları vardır. Bu tarz orifis malzemelerinin fiyatları yapay safir veya yakut olanlardan yaklaşık 30 kat daha fazladır ancak kullanım zamanları yaklaşık 1000 saate tekabül etmektedir. Elmas orifisler daha uygun bir akış oluşmasını sağlarlar ve yapay safir ve yakut olanlara kıyasla daha uzun zaman bu akışı aynı hassasiyette tutmayı başarırlar. Jet kalitesi kesme hızını doğrudan etkileyen bir faktör olduğu için elmastan imal edilen orifisler düşük maliyet karşılığı tedarik edilen orifislere nazaran daha kaliteli sonuçlar verirler.

Sudaki bazı mineral ve katışım malzemeleri elmas orifislerde aşınma varmış izlenimi doğruabilir ancak ultrasonik bir temizleyici aracılığıyla hemen temizlenmesi mümkündür (www.thefabricator.com, 2011).

1 mm çapındaki nozullar endüstride tipik olarak kullanılmaktadır bu nedenle 1 mm ve üzerindeki delik çaplarının oluşturulması sorun teşkil etmemektedir. Daha küçük deliklerin açılması daha küçük nozul ve orifis gerektirmektedir. 0,5 mm. çapındaki nozulları bulmakta genellikle mümkündür ancak bu çapın altındaki nozulların özel olarak sipariş edilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda 120 meş'lik tanecikler (yaklaşık olarak 120 mikron) nozulların tıkanmasının önüne geçmek amacıyla kullanılmaktadır. Bugünün küçülen dünyasında teknolojik gelişimler ASJ sayesinde çok daha küçük deliklerin açılmasının sağlanacağını göstermektedir. Halen bazı gelişmeler mevcut olmakla beraber bunlar başlangıç aşamasında olup bu husus geleceğin üzerinde çalışılan sahalardan birisi olacaktır.

Kesme derinliği ve ilerleme hızı arasında direk bir ilişki mevcuttur ve ilerleme hızının artırılması kesme derinliğinin azaltılmasını anlamını taşımaktadır.

7.7. Malzeme Türü, Basınç, Kesme Hızı ve Su Jeti Çapı Değişimleri ile Yüzey Kalitesi En Yüksek Kesimin Belirlenmesi

ASJ ile kesmede istenilen kesme hassasiyetinin elde edilmesinde yüzey kalitesi ve yüzeyde meydana gelen eğimli çizgiler ana faktörlerdir. Yüzeydeki sonlandırma işlemleri hemen hemen bütün kesmelerde önem taşıyor olmasına rağmen yüzeyde meydana gelen eğimli çizgiler ASJ ile yapılan kesmelerde olduğu gibi tanecik etkisiyle yapılan kesim işlemlerinin spesifik özelliklerinden olmaktadır. Bunun olmasının nedeni taneciklerin yer aldığı huzmenin taşıdığı enerji ve kesme işlemi için gerekli olan enerjinin birbirleri ile oranlarının düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Bir ASJ işleminde huzme malzemeye nüfuz ettikçe huzmenin kesme gücü azalmakta ve kesme yüzeyinin alt kısımlarında eğimli çizgiler meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalar ilerleme hızındaki artışın yüzeyde meydana gelen eğimli çizgilerde sabit bir artışa neden olacağını göstermektedir (Kumar, 2005).

En uygun ilerleme değerlerini kullanarak alınması gereken uygulama biçimleri sırasıyla;

- Özgül enerjinin minimum seviyede tutulması ve iki kesme işlemi arasında sürekli malzeme aşındırılması için aralıklı kesme işleminin gerçekleştirilmesi,
- Çok pasolu kesme işlemi,
- Maksimum kesme derinliğine ulaşmak için paso sayıları ve ilerleme miktarlarının en uygun şekilde kombinasyonudur.

8. SONUÇLAR

ASJ kullanılarak hassas yüzey elde etmek için malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve nozul çapındaki değişikliklerin etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmada, BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çelikleri; malzeme türü, basınç, ilerleme hızı ve nozul çapı değişiklikleri yapılarak karşılaştırılmış ve yüzey kalitesinin analiz edilmesine yönelik sonuçlar bulunmuştur. Bu çalışmada 3300 bar basınç, 20 mm/dak. ilerleme hızı ve 1 mm.'lik nozul çapı kullanımıyla yapılan kesimlerde, BS 7191 355 EMZ malzemeyle, ASTM A516 Gr.60 malzemeye kıyasla daha hassas yüzey elde edildiği tespit edilmiştir. Aynı malzeme türünde basınç, ilerleme hızı ve nozul çapı azaldıkça yüzey kalitesinin daha da arttığı belirlenmiştir.

8.1. Malzeme Türüne Bağlı Olarak Yüzey Kalitesi Değerlendirmesi

Çizelge 8.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemenin Yüzey Hassasiyet Değerleri

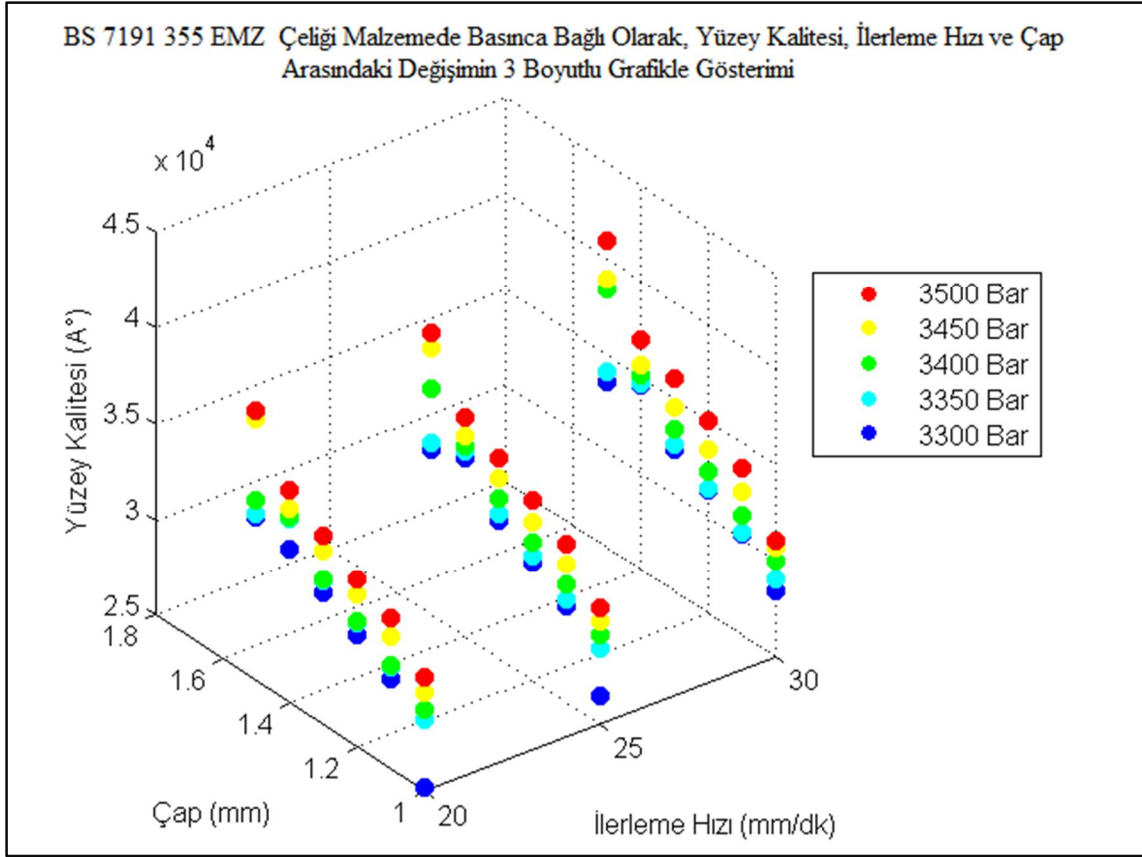
BS 7191 355 EMZ Çeliği				
Kesim Numarası	Çap (1mm)	İlerleme Hızı (mm/dak.)	Basınç (Bar)	Yüzey Kalitesi (Á)
1. Kesim	1	20	3300	25201
2. Kesim	1	25	3300	26452
3. Kesim	1	30	3300	28415
4. Kesim	1	20	3350	28735
5. Kesim	1	25	3350	28935
6. Kesim	1	30	3350	29062
7. Kesim	1	20	3400	29240
8. Kesim	1	25	3400	29610
9. Kesim	1	30	3400	29946
10. Kesim	1	20	3450	30178
11. Kesim	1	25	3450	30358

12. Kesim	1	30	3450	30698
13. Kesim	1	20	3500	30974
14. Kesim	1	25	3500	31037
15. Kesim	1	30	3500	31055
16. Kesim	1,1	20	3300	29721
17. Kesim	1,1	25	3300	29998
18. Kesim	1,1	30	3300	30267
19. Kesim	1,1	20	3350	30296
20. Kesim	1,1	25	3350	30342
21. Kesim	1,1	30	3350	30377
22. Kesim	1,1	20	3400	30424
23. Kesim	1,1	25	3400	31110
24. Kesim	1,1	30	3400	31182
25. Kesim	1,1	20	3450	31897
26. Kesim	1,1	25	3450	32154
27. Kesim	1,1	30	3450	32497
28. Kesim	1,1	20	3500	32862
29. Kesim	1,1	25	3500	33247
30. Kesim	1,1	30	3500	33669
31. Kesim	1,2	20	3300	30827
32. Kesim	1,2	25	3300	31094
33. Kesim	1,2	30	3300	31364
34. Kesim	1,2	20	3350	31429
35. Kesim	1,2	25	3350	31440
36. Kesim	1,2	30	3350	31488
37. Kesim	1,2	20	3400	31520
38. Kesim	1,2	25	3400	32218
39. Kesim	1,2	30	3400	32401
40. Kesim	1,2	20	3450	32995
41. Kesim	1,2	25	3450	33275

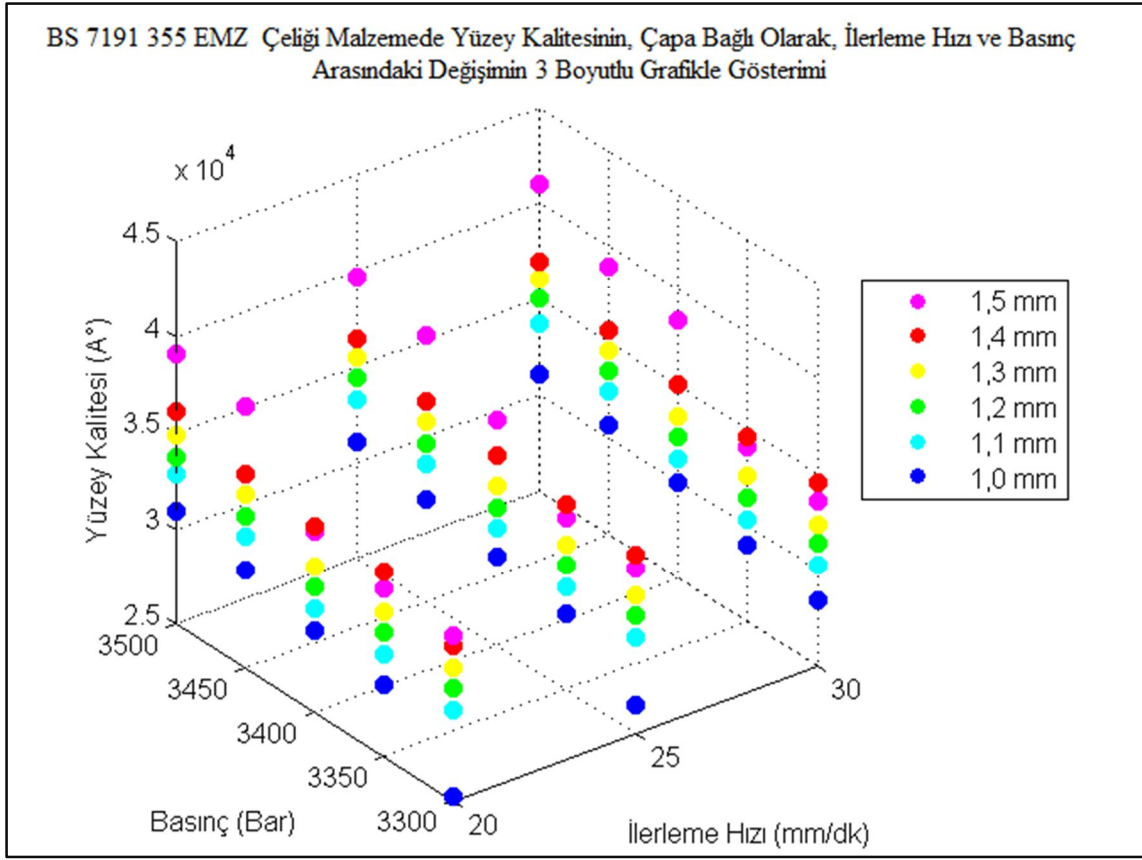
42. Kesim	1,2	30	3450	33504
43. Kesim	1,2	20	3500	33765
44. Kesim	1,2	25	3500	34356
45. Kesim	1,2	30	3500	34987
46. Kesim	1,3	20	3300	31953
47. Kesim	1,3	25	3300	32209
48. Kesim	1,3	30	3300	32365
49. Kesim	1,3	20	3350	32515
50. Kesim	1,3	25	3350	32547
51. Kesim	1,3	30	3350	32588
52. Kesim	1,3	20	3400	32621
53. Kesim	1,3	25	3400	33323
54. Kesim	1,3	30	3400	33410
55. Kesim	1,3	20	3450	34098
56. Kesim	1,3	25	3450	34347
57. Kesim	1,3	30	3450	34531
58. Kesim	1,3	20	3500	34873
59. Kesim	1,3	25	3500	35466
60. Kesim	1,3	30	3500	36088
61. Kesim	1,4	20	3300	33036
62. Kesim	1,4	25	3300	34317
63. Kesim	1,4	30	3300	34587
64. Kesim	1,4	20	3350	34632
65. Kesim	1,4	25	3350	34654
66. Kesim	1,4	30	3350	34693
67. Kesim	1,4	20	3400	34727
68. Kesim	1,4	25	3400	34927
69. Kesim	1,4	30	3400	35134
70. Kesim	1,4	20	3450	35211
71. Kesim	1,4	25	3450	35469

72. Kesim	1,4	30	3450	35612
73. Kesim	1,4	20	3500	36127
74. Kesim	1,4	25	3500	36368
75. Kesim	1,4	30	3500	36927
76. Kesim	1,5	20	3300	33567
77. Kesim	1,5	25	3300	33604
78. Kesim	1,5	30	3300	33638
79. Kesim	1,5	20	3350	33791
80. Kesim	1,5	25	3350	33980
81. Kesim	1,5	30	3350	34126
82. Kesim	1,5	20	3400	34426
83. Kesim	1,5	25	3400	36728
84. Kesim	1,5	30	3400	38484
85. Kesim	1,5	20	3450	38677
86. Kesim	1,5	25	3450	38844
87. Kesim	1,5	30	3450	38935
88. Kesim	1,5	20	3500	39099
89. Kesim	1,5	25	3500	39677
90. Kesim	1,5	30	3500	40964

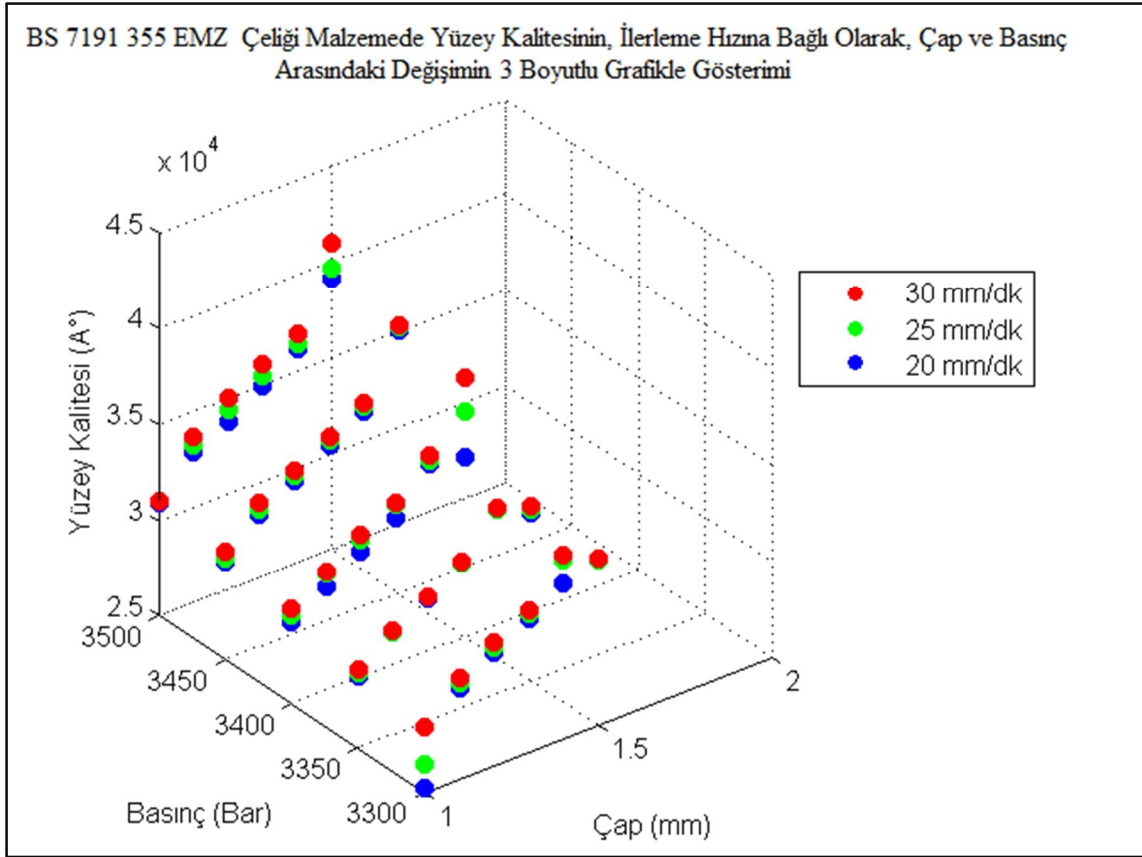
BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemenin yüzey hassasiyetinin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmada, en hassas yüzey 25201 Å ile 20 mm/dak ilerleme hızı, 3300 Bar ve 1 mm.lik nozul çapı ile yapılan kesimde elde edilmiştir.



Şekil 8.1. BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Basınca Bağlı Olarak, Yüzey Kalitesi, İlerleme Hızı ve Çap Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi



Şekil 8.2. BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikte Gösterimi



Şekil 8.3. BS 7191 355 EMZ Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, İlerleme Hızına Bağlı Olarak, Çap ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikte Gösterimi

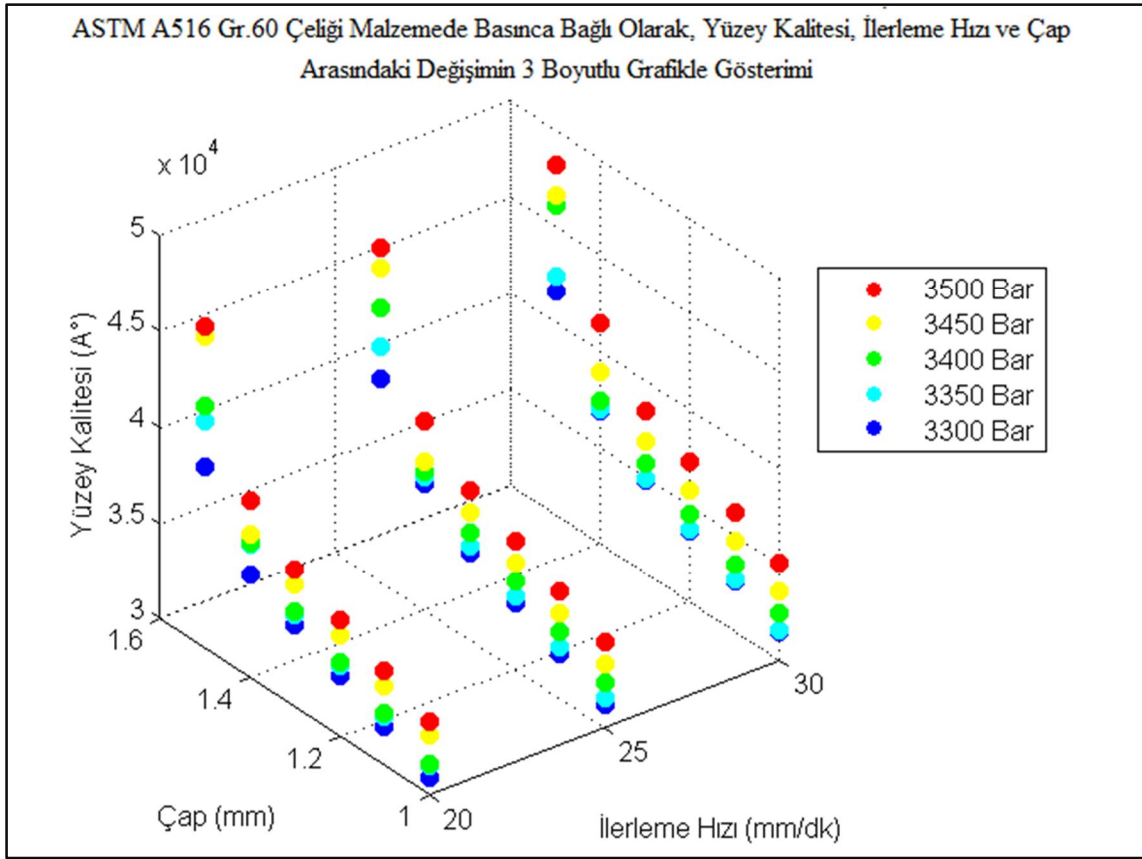
Çizelge 8.2. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemenin Yüzey Hassasiyet Değerleri

ASTM A516 Gr.60 Çeliği				
Kesim Numarası	Çap (1mm)	İlerleme Hızı (mm/dak.)	Basınç (Bar)	Yüzey Kalitesi (Á)
1. Kesim	1	20	3300	30930
2. Kesim	1	25	3300	31193
3. Kesim	1	30	3300	31450
4. Kesim	1	20	3350	31504
5. Kesim	1	25	3350	31542

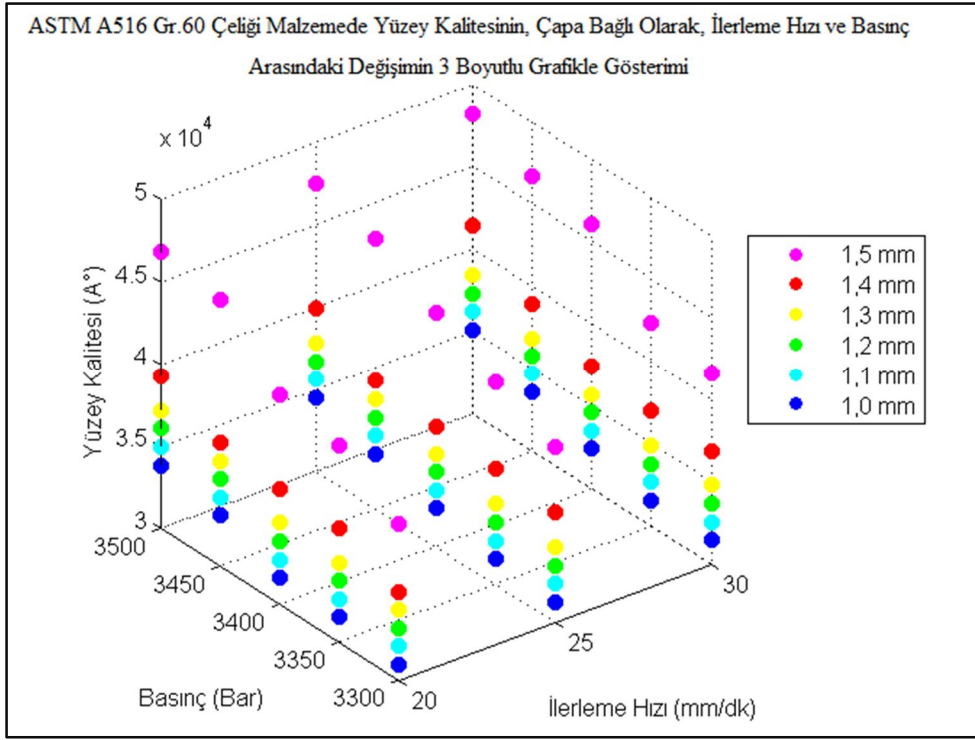
6. Kesim	1	30	3350	31585
7. Kesim	1	20	3400	31622
8. Kesim	1	25	3400	32315
9. Kesim	1	30	3400	32400
10. Kesim	1	20	3450	33082
11. Kesim	1	25	3450	33342
12. Kesim	1	30	3450	33602
13. Kesim	1	20	3500	33867
14. Kesim	1	25	3500	34453
15. Kesim	1	30	3500	35075
16. Kesim	1,1	20	3300	32033
17. Kesim	1,1	25	3300	32299
18. Kesim	1,1	30	3300	32559
19. Kesim	1,1	20	3350	32611
20. Kesim	1,1	25	3350	32644
21. Kesim	1,1	30	3350	32689
22. Kesim	1,1	20	3400	32726
23. Kesim	1,1	25	3400	33421
24. Kesim	1,1	30	3400	33504
25. Kesim	1,1	20	3450	34189
26. Kesim	1,1	25	3450	34446
27. Kesim	1,1	30	3450	34709
28. Kesim	1,1	20	3500	34974
29. Kesim	1,1	25	3500	35559
30. Kesim	1,1	30	3500	36181
31. Kesim	1,2	20	3300	33139
32. Kesim	1,2	25	3300	33402
33. Kesim	1,2	30	3300	33666
34. Kesim	1,2	20	3350	33719
35. Kesim	1,2	25	3350	33750

36. Kesim	1,2	30	3350	33790
37. Kesim	1,2	20	3400	33831
38. Kesim	1,2	25	3400	34527
39. Kesim	1,2	30	3400	34611
40. Kesim	1,2	20	3450	35296
41. Kesim	1,2	25	3450	35551
42. Kesim	1,2	30	3450	35816
43. Kesim	1,2	20	3500	36077
44. Kesim	1,2	25	3500	36666
45. Kesim	1,2	30	3500	37289
46. Kesim	1,3	20	3300	34245
47. Kesim	1,3	25	3300	34509
48. Kesim	1,3	30	3300	34777
49. Kesim	1,3	20	3350	34825
50. Kesim	1,3	25	3350	34855
51. Kesim	1,3	30	3350	34898
52. Kesim	1,3	20	3400	34932
53. Kesim	1,3	25	3400	35633
54. Kesim	1,3	30	3400	35718
55. Kesim	1,3	20	3450	36400
56. Kesim	1,3	25	3450	36657
57. Kesim	1,3	30	3450	36823
58. Kesim	1,3	20	3500	37185
59. Kesim	1,3	25	3500	37773
60. Kesim	1,3	30	3500	38395
61. Kesim	1,4	20	3300	35348
62. Kesim	1,4	25	3300	36617
63. Kesim	1,4	30	3300	36883
64. Kesim	1,4	20	3350	36932
65. Kesim	1,4	25	3350	36963

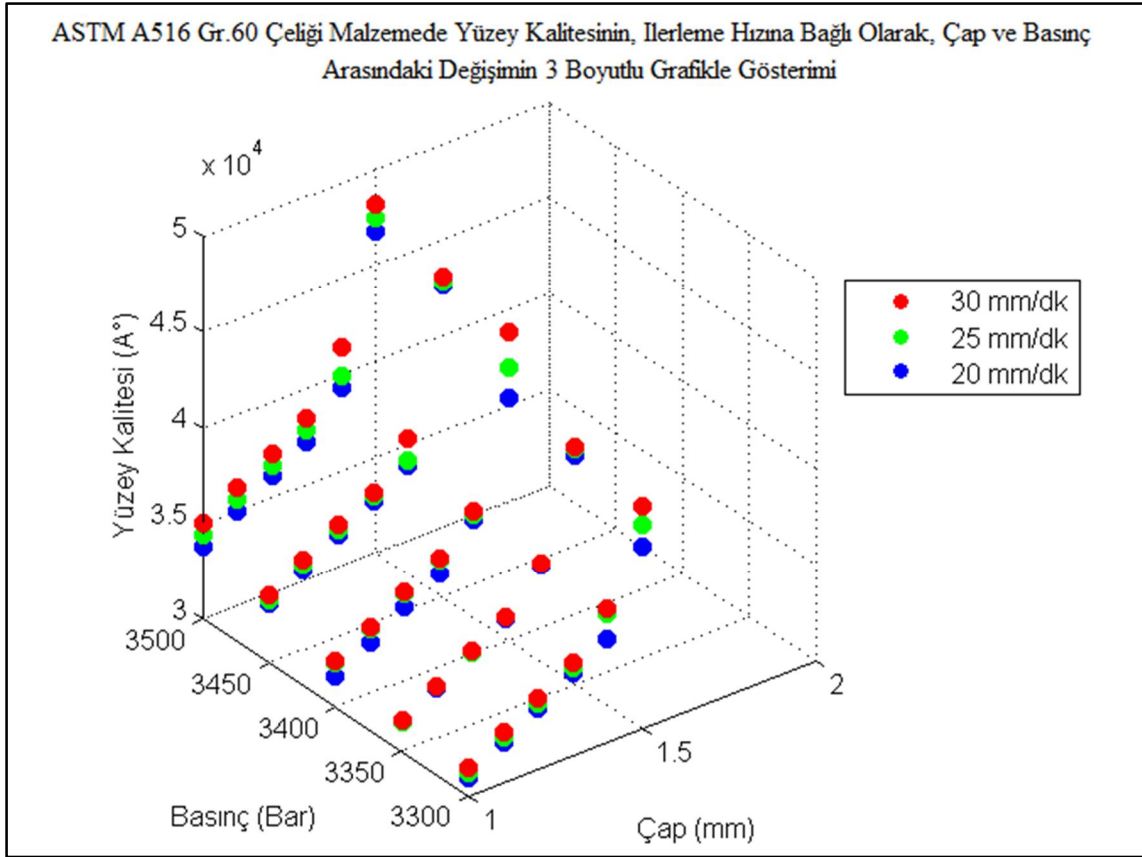
66. Kesim	1,4	30	3350	37004
67. Kesim	1,4	20	3400	37038
68. Kesim	1,4	25	3400	37235
69. Kesim	1,4	30	3400	37446
70. Kesim	1,4	20	3450	37521
71. Kesim	1,4	25	3450	37779
72. Kesim	1,4	30	3450	38931
73. Kesim	1,4	20	3500	39294
74. Kesim	1,4	25	3500	39880
75. Kesim	1,4	30	3500	41444
76. Kesim	1,5	20	3300	39496
77. Kesim	1,5	25	3300	40577
78. Kesim	1,5	30	3300	41612
79. Kesim	1,5	20	3350	41899
80. Kesim	1,5	25	3350	42258
81. Kesim	1,5	30	3350	42417
82. Kesim	1,5	20	3400	42685
83. Kesim	1,5	25	3400	44244
84. Kesim	1,5	30	3400	46098
85. Kesim	1,5	20	3450	46278
86. Kesim	1,5	25	3450	46399
87. Kesim	1,5	30	3450	46681
88. Kesim	1,5	20	3500	46820
89. Kesim	1,5	25	3500	47453
90. Kesim	1,5	30	3500	48217



Şekil 8.4. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Basınca Bağlı Olarak, Yüzey Kalitesi, İlerleme Hızı ve Çap Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikle Gösterimi



Şekil 8.5. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, Çapa Bağlı Olarak, İlerleme Hızı ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikte Gösterimi



Şekil 8.6. ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemede Yüzey Kalitesinin, İlerleme Hızına Bağlı Olarak, Çap ve Basınç Arasındaki Değişimin 3 Boyutlu Grafikte Gösterimi

8.2. İki Çelik Malzemenin Yüzey Kalitesinin Kıyaslanması

BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çelik malzemelerinin birbirleriyle kıyaslanması sonucunda aynı kesim parametrelerinde BS 7191 355 EMZ malzemenin ASTM A516 Gr.60 çelik malzemeye kıyasla daha hassas yüzey elde edilmesine uygun olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 8.3. BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Malzemelerin Yüzey Hassasiyetlerinin Kıyaslanması

BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Çeliğinin Yüzey Hassasiyetlerinin Kıyaslanması		
Kesim Numarası	BS 7191 355 EMZ (Á)	ASTM A516 Gr.60 (Á)
1. Kesim	25201	30930
2. Kesim	26452	31193
3. Kesim	28415	31450
4. Kesim	28735	31504
5. Kesim	28935	31542
6. Kesim	29062	31585
7. Kesim	29240	31622
8. Kesim	29610	32315
9. Kesim	29946	32400
10. Kesim	30178	33082
11. Kesim	30358	33342
12. Kesim	30698	33602
13. Kesim	30974	33867
14. Kesim	31037	34453
15. Kesim	31055	35075
16. Kesim	29721	32033
17. Kesim	29998	32299
18. Kesim	30267	32559
19. Kesim	30296	32611
20. Kesim	30342	32644
21. Kesim	30377	32689
22. Kesim	30424	32726
23. Kesim	31110	33421
24. Kesim	31182	33504

25. Kesim	31897	34189
26. Kesim	32154	34446
27. Kesim	32497	34709
28. Kesim	32862	34974
29. Kesim	33247	35559
30. Kesim	33669	36181
31. Kesim	30827	33139
32. Kesim	31094	33402
33. Kesim	31364	33666
34. Kesim	31429	33719
35. Kesim	31440	33750
36. Kesim	31488	33790
37. Kesim	31520	33831
38. Kesim	32218	34527
39. Kesim	32401	34611
40. Kesim	32995	35296
41. Kesim	33275	35551
42. Kesim	33504	35816
43. Kesim	33765	36077
44. Kesim	34356	36666
45. Kesim	34987	37289
46. Kesim	31953	34245
47. Kesim	32209	34509
48. Kesim	32365	34777
49. Kesim	32515	34825
50. Kesim	32547	34855
51. Kesim	32588	34898
52. Kesim	32621	34932
53. Kesim	33323	35633
54. Kesim	33410	35718

55. Kesim	34098	36400
56. Kesim	34347	36657
57. Kesim	34531	36823
58. Kesim	34873	37185
59. Kesim	35466	37773
60. Kesim	36088	38395
61. Kesim	33036	35348
62. Kesim	34317	36617
63. Kesim	34587	36883
64. Kesim	34632	36932
65. Kesim	34654	36963
66. Kesim	34693	37004
67. Kesim	34727	37038
68. Kesim	34927	37235
69. Kesim	35134	37446
70. Kesim	35211	37521
71. Kesim	35469	37779
72. Kesim	35612	38931
73. Kesim	36127	39294
74. Kesim	36368	39880
75. Kesim	36927	41444
76. Kesim	33567	39496
77. Kesim	33604	40577
78. Kesim	33638	41612
79. Kesim	33791	41899
80. Kesim	33980	42258
81. Kesim	34126	42417
82. Kesim	34426	42685
83. Kesim	36728	44244
84. Kesim	38484	46098

85. Kesim	38677	46278
86. Kesim	38844	46399
87. Kesim	38935	46681
88. Kesim	39099	46820
89. Kesim	39677	47453
90. Kesim	40964	48217

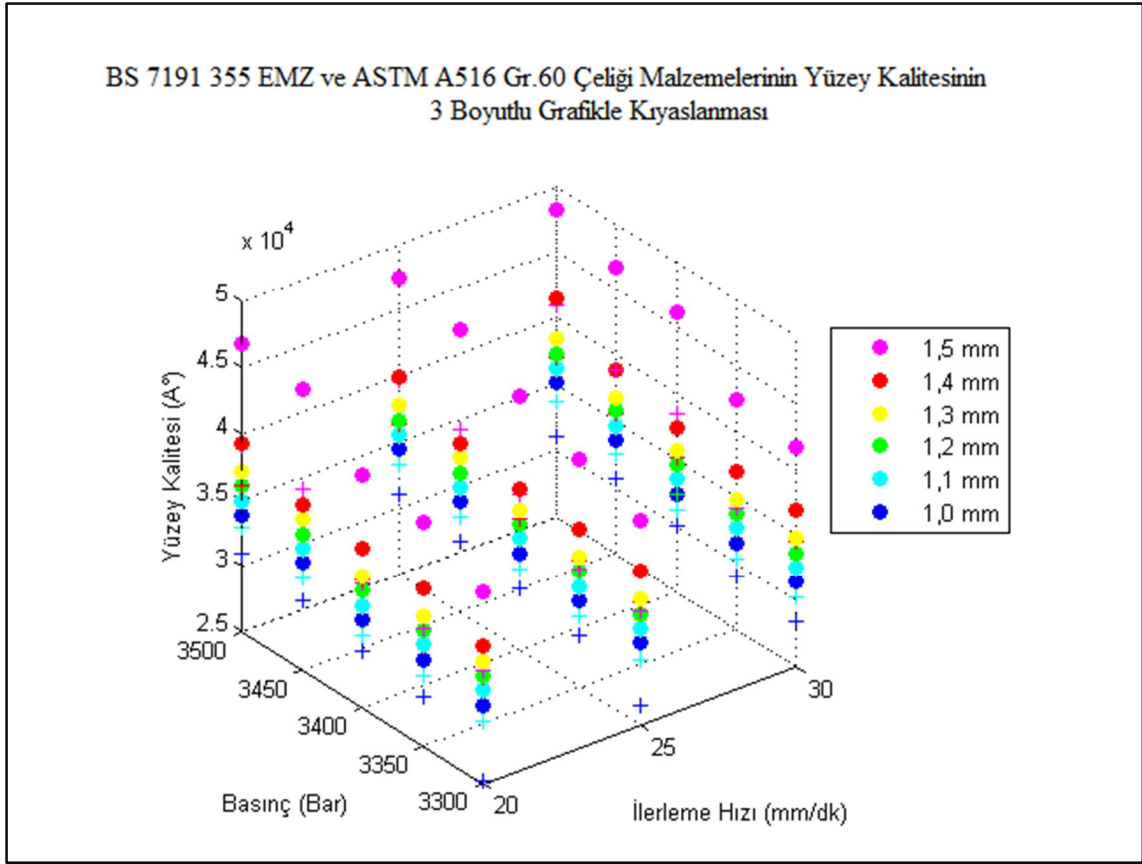
BS 7191 EMZ çeliğinin minimum akma dayanımı 305-355 MPa arasında ve uzama dayanımı 460-620 Mpa arasındadır. ASTM A516 Gr.60 çeliğinin minimum akma dayanımı 221 Mpa ve Uzama Dayanımı 414 – 496 Mpa arasındadır.

Yapılan deneyler sonucunda BS 7191 EMZ çeliğinin, ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemeye oranla aynı kesim şartlarında daha kaliteli bir yüzey elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Maksimum kesme derinliğine ulaşmak için paso sayıları ve ilerleme miktarlarının en uygun şekilde optimizasyonunun yapılması gerekmektedir. BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çelikleri ile yapılan deneylerin sonucunda;

- Malzeme Türü olarak BS 7191355 EMZ çeliği ile,
- 3300 Bar basınçta,
- 20 mm/dak. ilerleme hızında,
- 1 mm'lik nozul çapıyla 25201 Å değeriyle en hassas yüzeyin elde edilebileceği tespit edilmiştir.

İleride yapılacak endüstriyel çalışmalarda, BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 malzemeleriyle yapılan ASJ işlemlerinde yüksek yüzey hassasiyetinin elde edilmesi için BS 7191 355 EMZ malzemenin tercih edilmesi ve ASJ tezgah ayarlarınının 3300 Bar basınç, 20 mm/dak, 1 mm'lik nozul çapına ayarlanması uygun olacaktır.



Şekil 8.7. BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 Çeliği Malzemelerinin Yüzey Kalitesinin 3 Boyutlu Grafikle Kıyaslanması

9. ÖNERİLER

BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çeliği malzemeler okyanus tabanından geçen borularda ve deniz uçaklarının tabanlarında kullanılmaktadır.Söz konusu malzemelerin kullanımı sırasında hassas kesim işlemlerine ihtiyaç duyulduğu gözlemlenmiştir.

Malzemeleri ana kesme işleminden sonra bir başka bitirme işlemiyle istenilen hassasiyete getirmek hem zaman hem de maliyet kaybına yol açmaktadır.

İmalat merkezlerinde BS 7191 355 EMZ ve ASTM A516 Gr.60 çelik malzemeleri ile gerçekleştirilecek üretimlerde kaliteli bir yüzey elde etmek ve dolayısıyla taşlama, raspalama vb. gibi ikincil işlemlerden uzak kalarak daha maliyet-etkin üretim elde etmek için;

- BS 7191 355 EMZ malzeme ile,
- Küçük çaplı nozul kullanarak,
- Düşük ilerleme hızı ve
- Düşük basınçta kesim önerilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Adel, Abdel Rahman, 2005, An Abrasive Waterjet Model for Cutting Ceramics, Mathematical Models for Engineering Science , 68-72 p.

Bao, Ju, 2004, Study of Abbresive Water Jet Nozzle Materials And Plasma Transferred Arc Welding Coatings, University of Missouri-Rolla, Ph.D. Thesis, 3-5, 7, 61 p.

Coşansu, Gülay, 2010, Aşındırıcı Su Jeti İle Kesmede Kolemanit Tozunun Aşındırıcı Olarak Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 4, 9, 12, 16, 27 s.

Erden, Abdülkadir, 2002, Alışılmamış (Geleneksel Olmayan) İmalat Yöntemleri, Makine Mühendisliği El Kitabı, Cilt-2, 2,3 s.

Ergür, Hayriye Sevil, 2007, Aşındırıcı Su Jetinin Teorik Analizi ve Yapay Sinir Ağı, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 37, 38, 40, 44, 49, 51 s.

Geren, Necdet ve Tunç, Tarkan, 2000, Su Jeti Kesme Sistemlerinde Kullanılan Basınç Artırıcılarda Gerilme Analizleri ve Tasarım Sınırları, Makale, Çukurova Üniversitesi, 3s.

Jackna, Stefan, 1978, Assymetric Air Jet Impinging On a Hemispherical Concave Plate, Ph.D. Thesis, New-Jersey Institute of Technologies, 2 p

Khan, Ekramul Hasan,1989, An Investigation Of Dynamics Of Abbresive Water Jet Formation, Ph.D. Thesis, New-Jersey Institute of Technologies, 1-2 p.

Kuni, Alper, 2008, The Design Of The Water Jet Cutting Machine Intensifier Unit, M.Sc. Thesis, Cukurova University, 2 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Kumar, Mukesh, 2005, Abrasive Water Jet Cutting of Stainless Steel, M.Sc. Thesis, University of Delhi, 29 p.

Külekci, Mustafa Kemal ve Akkurt, Adnan, 2001, Aşındırıcılı Su Jeti İle Kesilerek Elde Edilen Yüzey Kalitesinin Değerlendirilmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 s.

Zhong, Yu, 2008, A Study of the Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Alumina Ceramics with Controlled Nozzle Oscillation, M.Sc.Thesis, The University of New South Wales, 32-33 p.

www.flowasia.com/waterjet-resources.cfm-id=335.htm

www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&LN=TR&NM=61

www.mencinger.biz

www.misumiusa.com/CategoryImages/Metric_2009_pdf/p2839.pdf

www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining/non_trad/waterjet

www.regencysteelasia.com

www.techniwaterjet.com/glass.html

www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/achieve-peak-waterjet-performance-by-optimizing-components

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

www.qualjet.com., 2005, 'The impact of pressure fluctuation on surface finish.' and
"Does abrasive waterjet cutting cause surface hardening?"

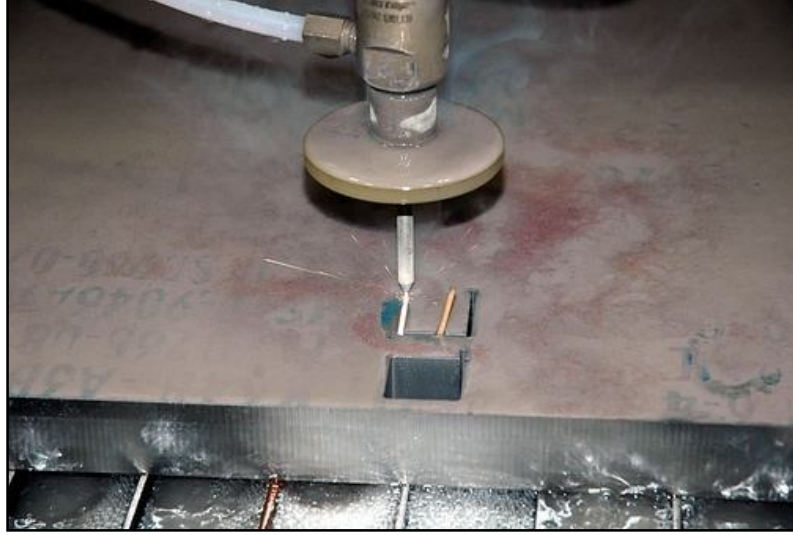
Waterjet-cutting-white-papers handbook, 2011, Accustream, 4

Ek Açıklamalar - A

Şekil A1. ASJ Tezgahında Kesim İşlemi (G.Kore, 2009)



Şekil A2. ASJ Tezgahında Kesim İşlemi (G.Kore, 2009)

Ek Açıklamalar – B

Şekil B1. ASJ ile 3,75 cm (1,5 inç) Kalınlığında Titanyum Malzeme Kesimi



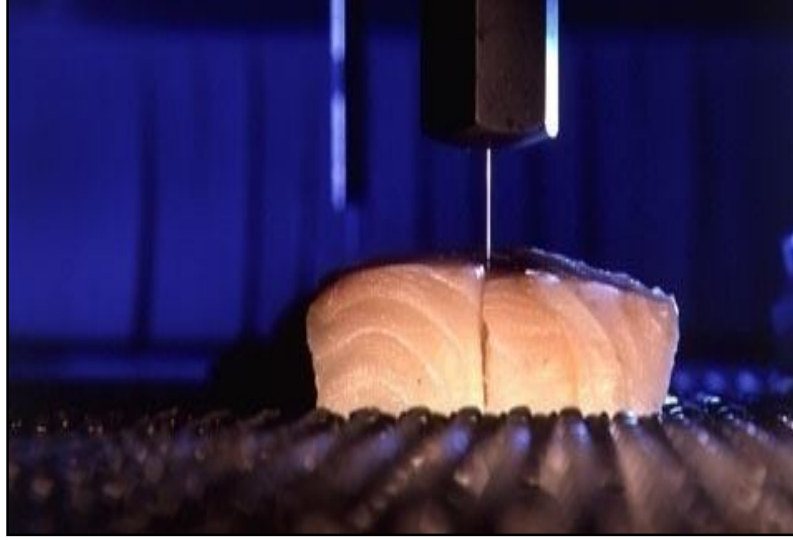
Şekil B2. ASJ ile Granit Malzeme Kesimi

Ek Açıklamalar – C

Şekil C1. ASJ ile Elde Edilen Bir Model Örneği



Şekil C1. ASJ ile Elde Edilen Parça Örnekleri

Ek Açıklamalar – D

Şekil D1. SJ ile Et Kesimi



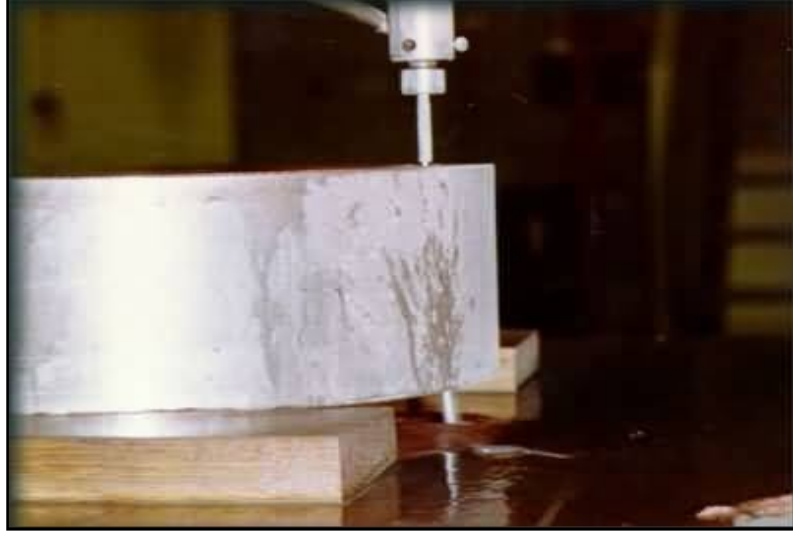
Şekil D2. SJ ile Şekillendirilmiş Gıda Ürünleri

Ek Açıklamalar - E

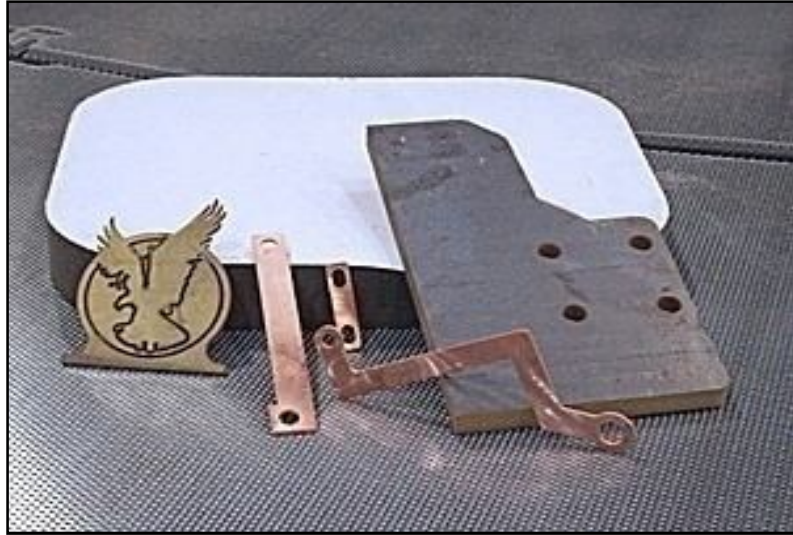
Şekil E1.ASJ ile Elde Edilen Hassas Parça Örnekleri



Şekil E2.ASJ ile Elde Edilen Hassas Parça Örnekleri

Ek Açıklamalar - F

Şekil F1. ASJ ile Inconel Malzeme Kesimi



Şekil F2. ASJ ile Bakır Malzeme Kesimi

ÖZGEÇMİŞ

Tamer SARAÇYAKUPOĞLU

18 Temmuz 1970 tarihinde Kahramanmaraş'ta doğdu. 1977 yılında Kahramanmaraş'ta başladığı ilkokul eğitimini 1982 yılında Ankara Dikmen İlkokulu'nda bitirdi. Akabinde Anıttepe Lisesi'nde orta ve lise eğitimi tamamladıktan sonra 1993 yılında Trakya Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi'nden Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 1994 yılında Hava Kuvvetleri Komutanlığı'na teğmen rütbesiyle katıldı.

Mayıs 2012'de Hava Kuvvetleri'nden ayrılarak THK Uçak Fabrikası'nda "Milli Uçak Üretim Projesi" Koordinatörü olarak İş Geliştirme ve Koordinasyon Müdürü kadrosunda göreve başladı.

1999-2001 yılları arasında ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Prof.Dr.Yaşar PANCAR'ın danışmanlığında jet pompaların analizi konusunda master çalışmasını tamamlayarak Makine Yüksek Mühendisi derecesini aldı.

Evli ve bir çocuk babası olan Tamer SARAÇYAKUPOĞLU 2003 yılından itibaren Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda doktora çalışmalarına başlamıştır.