

**İLERİ KESİM TEKNİKLERİNİN
KARŞILAŞTIRILMASI VE KESİLEN METAL
MALZEMENİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmet DAHİL

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr. Ayhan EROL

MAKİNE EĞİTİMİ

TEMMUZ 2008

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İLERİ KESİM TEKNİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI VE KESİLEN METAL
MALZEMENİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

İsmet DAHİL

DANIŞMAN

Yrd.Doç.Dr. Ayhan EROL

MAKİNE EĞİTİMİ

TEMMUZ 2008

ONAY SAYFASI

Yrd. Doç. Dr. Ayhan EROL danışmanlığında,

İsmet DAHİL tarafından hazırlanan

İleri Kesim Tekniklerinin Karşılaştırılması ve Kesilen Metal Malzemenin Özelliklerine Etkisi.
başlıklı bu çalışma, lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca

05 / 06 / 2008

tarihinde aşağıdaki jüri tarafından

Makine Eğitimi Anabilim Dalında

Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

	Ünvanı, Adı, SOYADI	İmza
Başkan	Doç.Dr. Yılmaz YALÇIN	
Üye	Doç.Dr. Ömer SOYKASAP	
Üye	Yrd.Doç.Dr. Ayhan EROL	

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetin Kurulu'nun
...../...../ 2008 tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Zehra BOZKURT
Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv

1.GİRİŞ	1
----------------	----------

2. GENEL BİLGİLER	7
--------------------------	----------

2.1 Su Jeti Kesme Teknolojisi	7
2.1.1 Su Jetiyle İşlenebilen Malzemeler	7
2.1.2 Aşındırıcılı Su Jetiyle İşlenebilen Malzemeler	7
2.1.3 Su Jeti Kesme Teknolojisinin Önemli Avantajları	8
2.1.4 Aşındırıcılı Su Jetiyle Geleneksel Su Jeti Sisteminin Farkları	10
2.1.5 Yüksek Basınç Su Jeti Çıkışı	13
2.2 Kullanım Alanlarına Uygun Su Jeti Kesme Sistemi Seçimi	15
2.2.1 Gıda sektöründe	16
2.2.2. Kağıt ve Mukavva Sanayinde	16
2.2.3 Tekstil ve Giyim Sektöründe	16
2.2.4 Kauçuk ve Plastik Sanayinde	17
2.2.5 Temizlik Sektöründe	17
2.2.6 Ayakkabı ve Deri Sanayinde	18
2.2.7 İzolasyon Uygulamalarında	18
2.2.8 Cam, Mermer ,Granit ve Seramik Sektöründe	18
2.2.9 Metal İşleme Sektöründe	19
2.2.10 Elektrik Elektronik Sanayinde	19
2.2.11 Otomotiv Sanayinde	20
2.2.12 Uzay ve Havacılık Sektöründe	20

2.3 Su Jetiyle Kesme İşleminin Amacı	20
2.4 Su Jeti Kesme Sisteminin Bileşenleri	21
2.4.1 Pompa Basıncının Etkisi	25
2.4.2 Yüksek Basınç Pompaları	26
2.4.3 Basınç Yükseltici Pompalar	26
2.4.4 Pistonlu Pompalar	27
2.4.5 Su Jeti Nozulları	30
2.4.5.1 Nozul Malzemeleri	30
2.4.5.2 Nozul Ömrü	31
2.4.6 Saf Su Jeti Nozulları	32
2.4.7 Aşındırıcılı Su Jeti Nozulları	34
2.5 Kesme Parametrelerinin Etkisi	37
2.5.1 Yanal Hızın Etkisi	37
2.5.2 Geçiş Sayısının Etkisi	38
2.5.3 Durma Mesafesinin Etkisi	38
2.5.4 Kesme Açısının Etkisi	39
2.6 Karıştırma Parametrelerinin Etkisi	39
2.6.1 Orifis Çapının Etkisi	39
2.6.2 Odaklama Tüpünün Çapının Etkisi	40
2.6.3 Odaklama Tüpü Boyutunun Etkisi	41
2.7 Aşındırıcı Malzemeler ve Özellikleri	42
2.7.1 Aşındırıcı Malzemelerin Yapısı	44
2.7.2 Aşındırıcı Malzemelerin Sertliği	44
2.7.3 Aşındırıcı Malzemelerin Şekil Özellikleri	45
2.7.4 Aşındırıcı Tane Çapının Etkisi	48
2.7.5 Aşındırıcı Malzemelerin Tane Büyüklüğü ve Tane Boyutu Dağılımı	50
2.7.6 Aşındırıcı Malzemelerin Tane Sayısı ve Kinetik Enerjisi	52
2.7.7 Aşındırıcı Malzeme İlave Metotları	55
2.7.8 Toplayıcılar	59
2.7.9 Basınç İletim Ekipmanları	61
2.7.10 Kontrol Ünitesi	63

2.8 Su Jetinin Elde Edilmesi Yapısı ve Özellikleri	64
2.8.1 Su Jetinin Kinetik Enerjisi	66
2.8.2 Saf Su Jetinin Yapısı	67
2.8.3 Aşındırıcılı Su Jetinin Yapısı	68
2.8.4 Aşındırıcılı Su Jetiyle Kesme İşlemi	71
2.8.4.1 Aşındırıcılı Su Jetiyle Kesilen Yüzeylerin Özellikleri	73
2.8.4.2 Su Kalitesi	75
2.8.4.3 Sıvı Özellikleri	77
2.8.4.4 Sıvı Basıncı	78
2.8.4.5 Sıvı Jet Çapı	79
2.8.5 Aşındırıcılı Su Jetinde Aşındırıcı Tanelerin Etkileşim Özellikleri	79
3. MATERYAL METOD	81
3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler	81
3.2 Kesme İşleminde Kullanılan Tezgahlarla İlgili Parametreler	83
3.2.1 Plazma İle Kesim Tezgahı	83
3.2.2 Lazer İle Kesim Tezgahı	84
3.2.3 CNC Tel Erezyon Kesim Tezgahı	85
3.2.4 Aşındırıcılı Su Jeti Kesim Tezgahı	86
3.3 Aşındırıcılar ve İlgili Parametreler	88
3.4 Kullanılan Ölçü Aletleri ve Görüntüleme Cihazları	90
3.5 Deneysel Metod	90
3.5.1 AWJ İle Kesilen Yüzeylerin Metalurjik Yapılarında Meydana Gelen Değişimler Sonucu Sertlik Analizlerinin İncelenmesi	90
3.5.2 Farklı Kesme Yöntemlerinin Malzeme İç Yapısında Oluşturduğu Yapısal Değişikliklerin İncelenmesi	91
4. BULGULAR	93
4.1 Aşındırıcılı Su Jeti İle Kesilen Farklı Kalınlık ve Sertlikteki Malzemelerin İç Yapılarındaki Değişimlerin Değerlendirilmesi	93
4.2 AWJ İle Farklı Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırılması	99

4.2.1 Farklı Kesme Yöntemlerinin Malzemelerin Metalurjik Yapısı Üzerindeki Etkileri	102
4.2.2 Farklı Kesme Yöntemleri İle Kesilen Numunelerde Kesilen Yüzeyden Merkeze Doğru İç Yapı ve Sertlik Değişimleri	104
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	112
5.1 Sonuçlar	112
5.2 Öneriler	114
6. KAYNAKLAR	117
6.1 İnternet Kaynakları	118
7.ÖZGEÇMİŞ	119

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İleri Kesim Tekniklerinin Karşılaştırılması ve Kesilen Metal Malzemenin Özelliklerine Etkisi

İsmet DAHİL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Eğitimi Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ayhan EROL

Gelişen ve zorlaşan günümüz rekabet şartlarında, ürünün piyasada istenen yeri edinebilmesi için, çoğu kez hammaddelere yüksek veya yeni teknoloji ilavesi gerekmektedir. Teknoloji seçiminde ileri veya yeni teknolojiler tam olarak bilinmediği ve incelenmediği zaman da rekabet şansı yitirilmektedir. Oysa en uygun seçimin yapılması rekabet için önemlidir. Yapısal farklılıklar içeren su-jeti teknolojisi sağladığı operasyonel ve ekonomik faydalardan dolayı gelişmiş ülke endüstrilerinde yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışma daha iyi bir rekabet şansı için, aşındırıcılı su jeti(AWJ) ile metal kesmede işlem basamaklarını, kesme parametrelerini belirtmek ve diğer metal kesme yöntemlerine göre üstünlüklerinin araştırılıp geliştirilmesine yardımcı olmaktadır.

Genel olarak, yüzey kalitesinin önemli olmadığı uygulamalar için 3000 bar a kadar çıkabilen pompalı sistemlerin kullanımı uygun ve ekonomiktir. Çok yüksek kesme hızları ve iyi yüzey kalitesi için 3000 barın üzerine çıkılması gerektiğinden çift etkili basınç arttırma yöntemini içeren sistemlerin tercih edilmesi gerekir. En iyi yüzey kalitesi için ise (kesilen yüzeyde 50 mikron derinliğinde izler) basınç dalgalanmasının hemen hiç olmadığı fazlı çift etkili basınç arttırma yöntemini kullanan sistemler kullanılmalıdır.

Temmuz 2008 119 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcılı su jeti, metal kesme, su jeti teknolojisi, ileri aşındırıcılı su jeti uygulamaları.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

Comparison of Advanced Cutting Techniques and Effects on Cut Metal Materials' Properties

İsmet DAHİL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Mechanical Education Program

Supervisor: Yrd. Doç. Dr. Ayhan EROL

Global competition is forcing many end-user industries to use new or high technologies in order to add better value into their products. On the other hand when new technologies are not known or not deeply analysed, the chance for global competition may be lost. The suitable purchasing decision positively affects productivity and profit. Water-jet cutting systems which have many structural differences have been widely used in industrialised countries due to its superior operational and economic advantages. This study for helping, for the more chance of compation abrasive water jet and operation steps in metal cutting indicate to parameters of cutting and its advantage's research and developing to other metal cutting methods.

General, for surface quality's not important application until a 3000 bar with pump system use suitable and economical. So high speed of cutting an for good surface quality, it need over 3000 bar double effect pressure amplification method implication systems must it was prefer. For the most surface quality (50 micron deepness trace in cutting surface) pressure not be fluctuation double with phase effective pressure increasing method using systems must be use.

July 2008, 119 Page.

Key Words: Abrasive water jet, metal cutting, water jet technology, advanced abrasive water jet applications.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca tecrübelerinden ve yardımlarından faydalandığım danışman hocam sayın Yrd.Doç.Dr. Ayhan EROL'a, laboratuvar çalışmalarımda bana destek ve yardımlarını esirgemeyen AKÜ Metal Eğitimi Bölümü Arş.Grv sayın İbrahim GÜNEŞ'e, tez konusunda literatür ve bilgi desteği veren AKÜ İncehisar MYO öğretim üyesi sayın Yrd.Doç.Dr. İrfan Celal ENGİN'e tez için gerekli malzemelerin işlenmesinde kendi birikim ve imkanlarıyla kesme yöntemlerinde kullanılan tezgahlarını esirgemeyen Grafsan Makine Sanayi'ne, Yörükoğlu Lazer Kesim firmasına, Dörtüyl Plazma Kesim ve Makine Sanayine, Kalıpsan CNC Tel Erozyon Kesim şirketi sahibi sayın Abdurrahman KELEŞ'e, Metronom Su Jeti Kesim şirketi sahibi sayın Kürşat POLAT'a, tezimin yazılmasında ve bilgisayar işletim sistemleriyle programlarının kullanılmasında çok yardımcı olan AKÜ Makine Resmi ve Konstrüksiyonu Öğretmenliği Bölümü 3. Sınıf öğrencilerinden Gani ÇAKMAK ve Veysel ÖZDEMİR'e çalışmalarım sırasında gerekli anlayışı gösteren okul müdürüm sayın Enver MERMER'e, teşekkürlerimi sunarım.

İsmet DAHİL

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

W_N	Aşınma miktarı
ρ_a	Aşındırıcı yoğunluğu
σ_y	Malzemeyi sıkıştıran kuvvet
μ	Su jeti taşıma parametreleri momentumu
φ	Aşındırıcı çarpma (darbe) açısı
ε_M	özgül aşındırma enerjisi
ρ_a	Aşındırıcı yoğunluğu
q_H	Isı akışı
α	Çizgisel izlerin eğim açısı (çıkışta)
δ_f	Akış gerilimi
λ	Tüp yüzey pürüzlülüğüne bağlı basınç düşmesi sabitidir
a, b	Eğri benzetme katsayıları
$C_1 - C_7 - C_8$	İşleme parametrelerine bağlı katsayı
c	Jet içindeki aşındırıcı oranı
C_f	Hidrodinamik sürtünme katsayısı
C_L	Radyal çatlak genişliği
C_O	Deşarj katsayısı
C_V	Jet hızı deşarj katsayısı
D	Boru iç çapı
D_e	Su - katı filmi sönümlenmesi sebebiyle enerji kaybı
d_C	Aşındırıcı partikül etkin uç çapı
d_i	Jet çapı
d_n	Nozul çıkış çapı
d_p	Partikül ortalama çapı
d_0	Orifis çapı
d_{0thr}	Başlangıç orifis çapı
e	Yanal kesme mesafesi
η_{Ec}	Gerekli olan hidrolik enerji
E_A	Aşındırıcı kinetik enerjisi
E_c	Harcanan enerji oranı

E_{Diss}	Kayıp enerji
E_h	Nozul ucunda elde edilen sıvı jeti enerjisi
E_n	Erozyon numarası
E_M	Hedef malzeme uzatma elastığı katsayısı
E_{sp}	özgül (spesifik) enerji
f	Kesme önü yüzeyindeki sürtünme sebebiyle enerji kaybı
$f(d_p)$	Aşındırıcı parçacık boyut dağılımı
g	Yer çekimi sabiti
h	Kesme derinliği
h_c	Kesme-aşınma derinliği
h_d	Aşınma derinliği
h_{cr}	Radyal çatlak derinliği
h_{max}	Maksimum kesme derinliği
h_s	İş parçası kalınlığı
H_p	Aşındırıcı sertliği
H_M	Hedef malzeme sertliği
H	İş parçasındaki ısınmadan dolayı enerji kaybı
$K _C$	Gevreklik - Tokluk faktörü
L	Boru uzunluğu
l_f	Odaklama boyutu veya karıştırma borusunun uzunluğu
L_h	Kesik genişliği
M	Tek yönlü talaş kaldırma oranı
ϵ_{Mdef}	Deformasyon aşınma faktörü
m_m	Talaş kaldırma oranı
M_p	Aşındırıcı kütle akış oranı
m_w	Sıvının (suyun) debisi
N_m	İşlenebilirlik numarası
N_p	Yüzeyin, jetin etkisine maruz kaldığı süre sabiti
n_p	Paso (geçiş) sayısı
P	Sıvı (su) basıncı
Ph	Isı akısı değişimlerine bağlı katsayı
P_{thr}	Başlangıç basıncı
q	Yüzey faktörü
q_H	Sıcaklık dağılımı

r	Aşındırıcı ile sıvı kütlesi arasındaki akış oranı
R_t	Aşındırıcı partikül dairesellik faktörü
Re	Reynold sayısı
S	Aşındırıcı partikül küresellik faktörü
T	Oluşan maksimum sıcaklık
T_0	Ortam sıcaklığı
u	Yanal ilerleme
v	Jet hızı
v_0	Etkili su jeti hızı
v_a	Aşındırıcı parçacık hızı
V_c	Kritik hız
V_i	Gerçek hız
V_{in}	Sıvının (suyun) malzemeye çarpmadan önceki hızı
V_j	Bernoulli denkleminde elde edilen sabit
V_M	Her katı parçacıkla kaldırılan talaş hacmi
V_{out}	Sıvının (suyun) malzemeye çarptıktan sonraki hızı
X	Durma (stand-off) mesafesi
X_s	Sıkıştırılabilirlik faktörü
$X(h)$	Kesme mekanizmalarına bağlı enerji kaybı fonksiyonu
φ	Nispi işleme derinliğini

2. Kısaltmalar

WJ	Water Jet (Su Jeti)
AWJ	Abrasive Water Jet (Aşındırıcı Su Jeti)
AJM	Abrasive Jet Machining (Aşındırıcı Jet ile İşleme)
EBM	Electron Beam Machining (Elektron Huzmesi ile İşleme)
LBM	Laser Beam Machining (Laser ile İşleme)
PAM	Plasma Beam (Arc) Machining (Plazma Arkı ile Kesme)
USM	Ultrasonic Abrasive Machining (Ultrasonik işleme)
EDM	Electric Discharge Machining (Elektro Erozyon ile İşleme)
HAZ	Heat Affected Zone (Isıdan Etkilenmiş Bölge)
HCF	High Cycle Fatigue (Yüksek Çevrimli Yorulma)

CAMC	Contact Arc Metal Cutting (Temaslı Ark Metal Kesme)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Bilgisayar destekli imalat)
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar destekli tasarım)
CONV	Geleneksel Tezgahlarla İşleme
DIAJET	Direct Injection abrasive jet (Doğrudan Enjeksiyonlu Aşındırıcı Jet)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1 AWJ işlemede aşındırıcı taneciğin iki farklı biçimde malzeme taşıma şekilleri	4
Şekil 2.1 Su jeti sisteminin temel farkları	10
Şekil 2.2 ASJ kesiminde optimizasyon parametreleri	23
Şekil 2.3 Düzlemsel malzemelerin kesiminde kullanılan su jeti makinesi	24
Şekil 2.4 ASJ kesiminde pompa basıncının etkisi	25
Şekil 2.5 Basınç yükselticili pompa sistemi	26
Şekil 2.6 Pistonlu pompa sistemi	28
Şekil 2.7 Leach and Walker nozulunun yapısı	32
Şekil 2.8 Su jeti nozulunun genel yapısı	33
Şekil 2.9 Aşındırıcılı su jeti nozulunun genel yapısı	34
Şekil 2.10 Orifis odaklama tüpü bağlantı hataları sonucu oluşan sapmalar	35
Şekil 2.11 Aşındırıcı su jeti karışımı ve odaklama tüpündeki aşınmalar	36
Şekil 2.12 ASJ kesiminde yanıl hızın etkisi	37
Şekil 2.13 ASJ kesiminde durma mesafesinin kesme derinliğine etkisi	39
Şekil 2.14 ASJ kesiminde orifis çapının etkisi	40
Şekil 2.15 ASJ kesiminde odaklama çapının hacimsel talaş kaldırma miktarına etkisi	41
Şekil 2.16 Aşındırıcı tanelerin şekillerinin karakterizasyonunda kullanılan boy oranı	45
Şekil 2.17 Aşındırıcı tanelerin geometrik şekil karakteristikleri	46
Şekil 2.18 Aşındırıcı tanelerin şekil karakterizasyonu	47
Şekil 2.19 ASJ kesme işleminde kullanılan aşındırıcı tanelerin tipik şekilleri	48
Şekil 2.20 Aşındırıcı tane çapı kesme derinliği ilişkisi	49
Şekil 2.21 Aşındırıcı tane boyu dağılımı parametreleri kesme derinliği ilişkisi	50
Şekil 2.22 Aşındırıcı debisi kesme derinliği ilişkisi	53
Şekil 2.23 Alternatif enjeksiyon tipi ASJ nozulları	56
Şekil 2.24 Süspansiyon su jetlerinde aşındırıcı besleme yöntemleri	57
Şekil 2.25 Bypass prensibi ile çalışan DIAJET sistemi	57
Şekil 2.26 Bypass prensibi ile çalışan PREMAJET sistemi	58
Şekil 2.27 Direk pompalamam prensibiyle çalışan su jeti sistemi	59
Şekil 2.28 Değişik yapıdaki jet tutucular	60
Şekil 2.29 Bağlantı elemanlarında sızdırmazlık sağlanması	62

Şekil 2.30 Su jetinin oluşumu	64
Şekil 2.31 Yüksek hızlı su jetlerinin yapısı	67
Şekil 2.32 Aşındırıcı su jetinin doğrultu eksenine dik kesiti	70
Şekil 2.33 Aşındırıcı su jeti ile kesmede işlem aşamaları	72
Şekil 2.34 Aşındırıcı su jetiyle kesilen yüzey bölgeleri	73
Şekil 4.1 Kesme kenarından 2 mm mesafede sertlik değerleri	105
Şekil 4.2 Kesme kenarından 4 mm mesafede sertlik değerleri	106
Şekil 4.3 Kesme kenarından 6 mm mesafede sertlik değerleri	107
Şekil 4.4 HV 0.5'lik sertlik ölçüm grafikleri	108

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa No
Resim 2.1 Granat mineralinin mikroskop altındaki görünüşü	11
Resim 2.2 Su jeti sisteminde CAD/CAM uygulaması	12
Resim 2.3 Hassas kesimde kullanılan su jeti orifislerinin gerçek görünümü	33
Resim 2.4 Su jeti ve aşındırıcılı su jetinin nozuldan çıktıktan sonraki yayılımı	69
Resim 3.1 İşlenmemiş numuneler	82
Resim 3.2 Kesilmiş malzemelerin kesme yüzeyi fotoğrafları	82
Resim 4.1 İncelenen malzemelerin kesilmeden önceki mikro yapı fotoğrafları	94
Resim 4.2 Alaşımli çeliklerin aşındırıcılı su jeti kesme yöntemi ile kesilmesi ile elde edilen kesme kenarlarının mikro yapı fotoğrafları	95
Resim 4.3 Alaşımli çeliklerin plazma kesme yöntemi ile kesilmesi ile elde edilen kesme kenarlarının mikro yapı fotoğrafları	96
Resim 4.4 Alaşımli çeliklerin lazer kesme yöntemi ile kesilmesi ile elde edilen kesme kenarlarının mikro yapı fotoğrafları	97
Resim 4.5 Alaşımli çeliklerin tel erozyon kesme yöntemi ile kesilmesi ile elde edilen kesme kenarlarının mikro yapı fotoğrafları	98

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1 Su jetinin diğer yöntemlerle karşılaştırılması	9
Çizelge 2.2 Kesilecek malzemeye bağlı olarak kullanılabilen nozul tipleri	14
Çizelge 2.3 Su jeti sistemlerinin kullanım alanları	15
Çizelge 2.4 Aşındırıcı su jeti ile kesmede işlem parametreleri	22
Çizelge 2.5 Su jeti sisteminde kullanılan pompaların karşılaştırılması	29
Çizelge 2.6 Uygulanan basınca göre nozul malzemesi seçimi	30
Çizelge 2.7 Nozul ve aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri	31
Çizelge 2.8 Aşındırıcı malzemelerin sınıflandırılması	42
Çizelge 2.9 Aşındırıcı malzeme gücü eşitliğindeki katsayılar	43
Çizelge 2.10 Çeşitli aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri	45
Çizelge 2.11 Granat mineral türlerine göre şekil faktörünün değişimi	48
Çizelge 2.12 Tane boyutu dağılım fonksiyonları	52
Çizelge 2.13 Su jeti kesme sistemlerinde kullanılan basınçlı su iletim boru boyutları	61
Çizelge 2.14 Akışkan jet sistemleri için su kalitesi sistemleri	76
Çizelge 3.1 Deneyde kullanılan malzemelerin kimyasal özellikleri	81
Çizelge 3.2 CNC oksijen plazma ile kesim için kullanılan tezgaha ait teknik bilgiler	83
Çizelge 3.3 Lazer kesim için kullanılan tezgaha ait teknik bilgiler	84
Çizelge 3.4 CNC tel erozyon ile kesim için kullanılan tezgaha ait teknik bilgiler	85
Çizelge 3.5 Aşındırıcı su jeti kesim tezgahı teknik bilgileri	86
Çizelge 3.6 GMA Garnet aşındırıcının kimyasal bileşimi	88
Çizelge 3.7 Mineral bileşimi	89
Çizelge 3.8 Fiziksel karakteristik	89
Çizelge 3.9 Kesme kenarına komşu yüzeyde kullanılan dağılayıcı ve daldırma süresi	91
Çizelge 4.1 Farklı kesme yöntemlerine bağlı olarak kesme hızlarının karşılaştırılması	101
Çizelge 4.2 İleri kesme tekniklerinde kullanılan tezgahların ilk yatırım maliyetleri	102
Çizelge 4.3 Farklı kesme yöntemlerinin kesme kenarındaki metalürjik etkileri	103
Çizelge 4.4 Kesilen malzemelerin orijinal sertlik değerine bağlı olarak farklı kesme yöntemleri ile kesilen yüzeylerin % sertlik değişimleri	111

1. GİRİŞ

Suyun aşındırma etkisi eskiden beri çok iyi bilinmektedir. Bu en belirgin olarak akarsu kıyılarında görülmekte akan su araziye zamanla yavaş yavaş aşındırmaktadır. Su hızının normalden daha fazla olduğu taşkın zamanlarında aşındırmanın hızlandığı da bilinen bir olgudur. Suyun bu etkisi "Yüksek Basıncılı Su Jetlerinin" uygun konumlarda çeşitli malzemeler üzerine uygulanması ile çok daha iyi görülmektedir. Su jetleri, malzeme yüzeyine uzun bir süre tutulduğunda aşınma artmakta ve malzeme giderek parçalanmaktadır (Josef 1996).

İmalat teknolojisi, gelişen teknolojiye paralel bir gelişim göstermekte olup üretimde kalite ve ekonomi en çok aranan özelliklerdir. Bu amaçla, endüstrideki uygulayıcılar imalatta mümkün olan bütün seçenekleri kullanma çabası içine girmişlerdir. Maddelerin su ile kesilebileceği yıllardır bilinmekle beraber bu tekniğin güvenilirliği ve yeterliliği ancak son yıllarda olumlu bir seviyeye ulaşmıştır. Gelişmiş ülkelerde yaygın bir şekilde kullanılan su jeti teknolojisi; yüksek basınçlı su jetinin tahrip gücü ile yüzey işleme ve temizleme işlemlerinde 1968'den bu yana kullanılmaktadır (Hunziker 1990).

Su jetleri çok eski senelerden bu yana nispeten yumuşak malzeme ve kayaçların kesilip kazılmasında kullanılmaktadır. Bunların kullanılmasıyla gelişen kesme teknolojisi "Jet Kesme Teknolojisi" olarak bilinmektedir. Bu teknoloji son yirmi yılda hızlı bir gelişme göstermiştir. Su jetleriyle kesme geçilmeden önce, etkin bir su jeti elde etmek için birçok araştırma yapılmıştır. Etkin su jetleri elde edildikten sonra su jetleri, önce laboratuvarlar da çeşitli malzemelerin kesilmesi ve parçalanması çalışmalarında denenmiş ve daha sonra sanayi de uygulamaya geçilmiştir.

Su jeti kesme sistemi, basıncı artırılan suyun bir lüleden geçirilmesiyle elde edilen yüksek hızlardaki su jeti hüzmesinin veya aşındırıcı-su jeti karışımının, çarpma etkisiyle malzemeden parçacıklar aşındırması ve bunun sonucu olarak parçanın işlenmesi esasına dayanır. Kısaca, su jeti teknolojisi aşındırıcılı ve aşındırıcısız sistemler olmak üzere ikiye ayrılırlar.

İlk defa 1970 lerde kullanıma giren aşındırıcısız sistemler sadece su-jeti sistemleri olarak da adlandırılırlar. Isıl gerilmeler ve radyasyon oluşturmada parlak ve kompozit

malzemeler dahil, hemen her türlü malzemeyi kesip işleyebilen aşındırıcılı su-jeti sistemleri 1982 den sonra metal endüstrisinde ön plana çıkmıştır. (Külekçi 2002).

Aşındırıcı katkılı su jeti sistemlerinin lazer, elektron ışınli ve plazma ark kesme sistemlerine ilk yatırım maliyetleri ve içerdiği kesme özellikleri yönünden kesin üstünlük sağlamaları aşındırıcılı sistemlerin kullanımlarının yaygınlaşmasına neden olmuştur. Ayrıca, frezeleme işlemlerinde konvansiyonel talaş kaldırma sistemlerine, kesme kalitesi ve karmaşık şekilleri kesme yönünden üstünlük sağlarlar. Fakat daha yüksek çalışma basınçlarına çıkılması ve su jetinin dağılmasını önleyen bazı katkı maddelerinin de kullanılmasıyla, aşındırıcısız su jeti teknolojisi de daha yaygın kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Bu nedenle, metal endüstrisi haricindeki diğer endüstrilerde de su jeti teknolojisinin kullanımına çok hızlı bir geçiş olmuştur.

Su-jeti nozulunun robot, bilgisayar kontrollü sayısal konumlama tablası gibi esnek üretim sistemlerine rahatlıkla yerleştirilmesi ve karmaşık şekilleri yüksek kesme hızlarında kesebilmeleri bu sistemlerin gelişmiş ülkelerde kullanımını daha da yaygın hale getirmiştir. Son yıllarda, aynı tip ürün çeşitliliğinin artması tüketici taleplerini artan ürün çeşitliliği nedeniyle çok yüksek imalat sayılarından orta ve bazen de daha az sayıdaki üretime indirmiştir. Bu gereksinme, esnek imalat sistemleri kullanımını ve esnek imalat sistemlerine adapte olabilen teknolojileri ön plana çıkardığından aşındırıcılı ve aşındırıcısız su jeti sistemleri, kullanımı hızla artan yeni teknolojiler sınıfında yer almışlardır. Su-jeti sistemleri kesilen yüzey kalitesi, kesme hızı, uçucu kesme tozu çıkarmaması; aşındırıcısız sistemlerin gıda endüstrisi gibi sıhhi uygulamalarda kullanılabilir olması, kesme kuvvetlerinin çok küçük olması, sert, yumuşak, yapışkan malzemelerin aynı nozulla kesilebilmeleri, ince parçaların üst üste konularak aynı anda kesilebilmeleri gibi çok sayıda üstünlük sağlarlar. Sağladığı bu kadar çok üstünlüğe karşın, su-jeti teknolojisinin ülkemizde yeterince kullanılmasının en önemli nedeni bu teknolojinin yeterince tanınmıyor olmasıdır. Bu da, teknoloji seçiminde hatalı karara neden olan önemli faktörlerden biridir. Ayrıca, su jeti sistemleri de kendi yapılarında içerdikleri elemanlara bağlı olarak farklılıklar içerdiklerinden, en uygun sistemin seçimi daha da önem kazanmaktadır. Bu farklılıklar, sistemin kesme özelliklerini, ilk yatırım ve çalıştırma maliyetlerini etkilemektedir. Bu nedenle, her özel

uygulama için en uygun sistemin seçilmesi kullanıcı için önem taşımaktadır. (<http://www.waterjets.org>, <http://www.omax.com>)

Özellikle son yıllarda, sağladığı üstünlükler, esnek imalat sistemlerine olan gereksinme ve su-jeti sistemlerinin esnek imalata uyumluluğu su jeti kesme sistemlerinin gelişmiş ülkelerde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Su jeti sistemlerinin yapısı ve temel elemanları, kesilecek malzeme türü, kalınlığı ve istenen yüzey kalitesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

Ulusal ve uluslar arası rekabetin her geçen gün arttığı bir ortamda en uygun seçimin yapılması gittikçe önem taşımaktadır. Su jet (WJ) prosesi, temel olarak tahta, kâğıt, deri ve köpük gibi metal olmayan malzemelerin kesiminde kullanılmaktadır. Fakat mermer, seramik ve paslanmaz çelik gibi sert malzemelerin kesiminde verimli değildir.

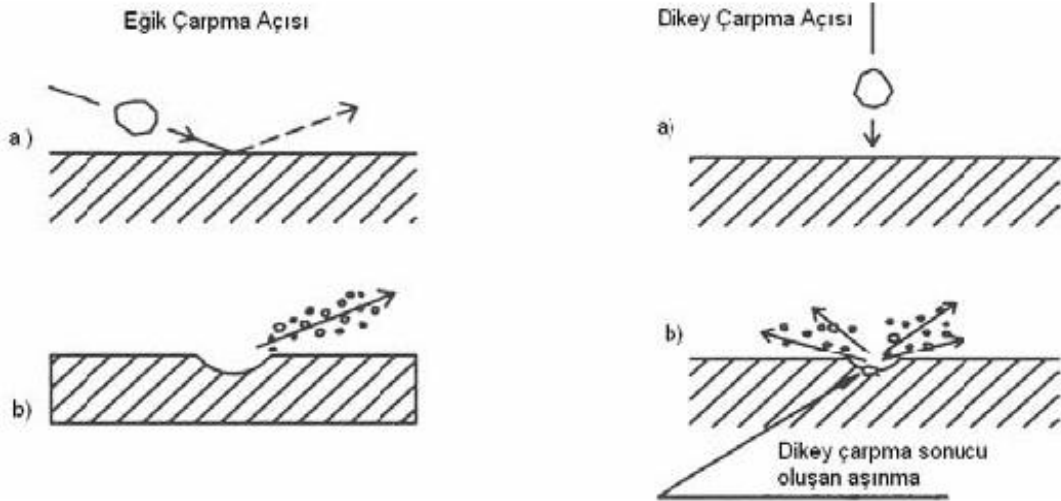
Aşındırıcılar su jeti ile karıştırılınca, Aşındırıcı su jet (AWJ), yeni ve daha güçlü bir proses oluşur. Her iki proses de, suyun çok yüksek basınca çıkarılması ve çok küçük bir delikten (orifice) çıkması prensibini kullanmaktadır. Giriş suyu tipik olarak 20,000 – 55,000 psi basıncı arasında değişmektedir. Bu, nozuldaki 0,15 – 0,4 mm arasında değişen çaptaki çok küçük bir delikten geçerek çok yüksek hıza ulaşır. Aşındırıcı jet işlemi, aşındırıcı taneciklerinin sert malzemeleri kesebilecek hıza çıkmasını sağlamak için aynı su jetini kullanır.

Aşındırıcı etkisiyle, her sertlikteki malzeme parçalanmadan ve termal olarak bozulmadan, aynı zamanda çok yüksek kesme oranıyla kesilebilir. Kesme oranı, besleme oranı, nozul ve malzeme arasındaki mesafe (standoff), su jeti basıncı veya aşındırıcı parametrelerinin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir. Her iki proseste de temel kesme mekanizması, erozyondur.

Aşındırıcı su jetinin tüm mühendislik malzemelerini kesme yeteneğinin yanı sıra frezeleme, tornalama ve delme gibi pek çok mekanik işlemde kullanılabilir olması ve bu işlemlerin tümünün aynı takım ile yapılabilmesi, takım seçimini de kolaylaştırır. Ancak AWJ'nin dinamik bir takım olması nedeniyle jet ile işlenen parçanın etkileşim mekanizmaları tam olarak anlaşılmamıştır. Uygulamaların tam anlamıyla başarılı olabilmesi için pek çok araştırmanın yapılması ve analitik açıklamalar getirilmesi

gerekmektedir. Şimdiye kadar yapılan çeşitli araştırmalar, bazı özel uygulamalardaki birçok problemi çözmüştür. Örneğin aşındırıcı taneciğin hedef malzeme üzerine geliş açısı yüzeyden parçacıkların taşınması hızı işlenen parçanın yüzey kalitesine oldukça etki eder. Şekil 1. de AWJ ile işlemede aşındırıcı taneciğin temel iki açıda malzeme aşındırma şekilleri görülmektedir. (Powell 1995).

Geleneksel işleme yöntemleri uygulandığında sorunlara yol açan titanyum alaşımları ve benzer özelliklerdeki metal alaşımlar, aşındırıcı su jeti ile çok daha kolay bir şekilde işlenebilmektedir. Kompozit malzeme kullanımının yaygınlaşması ve sandviç ağ tipi konstrüksiyonların kullanımı, mevcut kesme yöntemleriyle istenildiği gibi gerçekleşmemektedir. Aşındırıcı su jeti, bu uygulamalar için iyi bir çözüm oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı; aşındırıcı su jetinin sadece kesme uygulamalarında değil, bilinen diğer talaşlı işlemlerinde de kullanıldığını ve bu işlemlerin nasıl gerçekleştiğini ortaya koymaktır. Günümüzde farklı metotlar geliştirilerek uygulamada alternatif takımlar üretilmeye çalışılmaktadır. AWJ' yi alternatif bir takım haline dönüştüren çalışmalara en önemli örnek, Hashish tarafından geliştirilmiş olup Şekil 2'de gösterilmektedir (Hashish 1993).



Şekil 1 AWJ ile işlemede aşındırıcı taneciğin iki farklı biçimde malzeme taşıma şekilleri (Powell, 1995).

Düşük maliyet ve yüksek kaliteyi esas alan imalat sanayi için su jeti teknolojisi;

- Günümüz imalat sanayinin de kullanılan yeni bir kesme yöntemidir.
- Geleneksel kesme yöntemlerinin ekonomik olmadığı durumlarda, geleneksel kesme yöntemlerine yedek bir yöntemden ziyade onların yerine onlara alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.
- Kesme sırasında ısının istenmediği uygulamalarda "Soğuk kesme yöntemi" olarak tercih edilmektedir.
- Çevre etkisi, kesme hızları ve işletme maliyetleri incelendiğinde, geleneksel yöntemlerin yanı sıra lazer, plazma vb. modern yöntemlere göre de en çok tercih edilen yöntem görünümündedir.
- Her türden ve her kalınlıkta malzemeyi yüksek performansta kesebilmeye ve otomasyona çok uygun bir işleme yöntemidir.

Kısaca özetlenirse, su jeti sistemleri; kesilen yüzey kalitesi, yanal hızı, uçucu kesme tozu çıkarmaması; aşındırıcısız sistemlerin gıda endüstrisi gibi sıhhi uygulamalarda kullanılabilir olması, kesme kuvvetlerinin çok küçük olması, sert, yumuşak, yapışkan malzemelerin aynı nozulla kesilebilmeleri, ince parçaların üst üste konularak aynı anda kesilebilmeleri gibi çok sayıda üstünlük sağlar. Sağladığı bu kadar çok üstünlüğüne karşın, su jeti teknolojisinin ülkemizde yeterince kullanılmamasının en önemli nedeni bu teknolojinin yeterince tanınmıyor olmasıdır. Özellikle son yıllarda, sağladığı üstünlükler, esnek imalat sistemlerine olan ihtiyaç ve su jeti sistemlerinin esnek imalata uygunluğu, su jeti kesme sistemlerinin gelişmiş ülkelerde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Su jeti sistemlerinin, yapısı ve temel elemanları, kesilecek malzeme türü, kalınlığı ve istenen yüzey kalitesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Ulusal ve uluslar arası rekabetin her geçen gün arttığı bir ortamda en uygun seçimin yapılması gittikçe önem taşımaktadır. Bu durum, su jeti teknolojisi gibi çok detaylı olarak bilinmeyen fakat en uygun seçimin birçok faktöre bağlı olduğu yeni teknolojilerde daha da önem kazanmaktadır (Akkurt 2002).

Aşındırıcı su jetiyle işleme yönteminin çok fazla parametre içermesi nedeniyle, bu parametrelerin optimizasyonu önemli olmaktadır. Bu optimizasyonun gerçekleştirilebilmesi için; donanım kapasitesi, işleme parametreleri ve çeşitli fiziksel

olgular gibi pek çok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bütün bu özellikleri sebebi ile AWJ yönteminin daha iyi anlaşılması, daha etkin ve verimli kullanılması pek çok bilimsel araştırmaya konu olmuştur. Çok sayıdaki parametrenin etkilerinin henüz tam olarak anlaşılammış olması sebebiyle, AWJ ile işleme akademik anlamda en çok çalışılan konuların başında yer almaktadır.

Ülkemizde henüz tam anlamıyla tanınmayan bu işleme teknolojisinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak ve ülkemiz imalat sektöründe de yaygın ve etkili bir biçimde kullanılmasını teşvik etmek amacıyla yola çıkılan bu çalışmada, uluslar arası düzeyde yapılan çalışmalar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarla paralellik arz edecek ve bu çalışmalara katkı sağlayacak şekilde, yaygın kullanılan metal malzemelerin aşındırıcılı su jetiyle kesilebilirliği, değerlendirilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Su Jeti Kesme Teknolojisi

Su Jeti ile kesme teknolojisinin temeli, Basıncı artırılan suyun (4000 bar) dar bir aralıktan geçirilmesiyle elde edilen yüksek hızlardaki su jeti hüzmesinin çarpma etkisiyle malzemedan parçacıklar aşındırması ve bunun sonucu olarak da malzemenin işlenmesi esasına dayanmaktadır. 0.1 mm'den 200 mm kalınlığa kadar her türlü malzemeyi kesebilen bir yöntemdir. (Geren 2001).

Su jeti sistemi temel olarak iki grupta incelenmektedir.

1. Saf su jeti

2. Aşındırıcılı su jeti

2.1.1 Su Jeti İle İşlenebilen Malzemeler

Dondurulmuş gıdalar, Halı, İnce levha, İnce mum, Kağıt, Köpük, Mantar, Plastik Yumuşak poliüretan Sunta, Yumuşak veya ince ahşap, Yumuşak kauçuk, Yumuşak conta malzemesi.

2.1.2 Aşındırıcılı Su Jeti İle İşlenebilen Malzemeler

Alüminyum, Bakır, Cam, Cam takviyeli poliüretan, Granit Karbon elyafı, Kompozitler, Mermer, Naylon, Paslanmaz çelik (SAE 304-316), Pirinç, Pleksiglas, Polikarbonat, Poliüretan, Seramik, Sert kauçuk, Sert veya kalın ahşap, Takım çelikleri, Taş, Titanyum, Yumuşak çelik.

2.1.3 Su Jeti Teknolojisinin Önemli Avantajları

- Su jeti soğuk bir proses olması sayesinde,termik nedenlerden kaynaklanabilecek, yanma, erime, sertleşme şekil değiştirme gibi sorunlar olmaz
- Lazer ile kesilemeyecek farklı yanma veya erime sıcaklıklarına sahip malzeme çiftleri, su jeti ile kesilebilir.
- Malzeme yanması veya erimesi olmadığından, işlem sırasında hiçbir kimyasal kirlilik oluşmaz.Bu avantajı sayesinde ek yatırıma gerek göstermez.
- Kesim izi aralığının çok dar (max1,1mm) olması sayesinde malzeme kayıpları en aza indirilir.
- Kesici unsur olan su jeti huzme çapına bağlı olarak , çok dar ve keskin köşelerin işlenmesi mümkündür.
- Diğer yöntemlerle kesilemeyecek petek dokulu tüm malzemeler, su jeti ile kesilebilir.
- Su jeti ile kesilme kesitinde, alt veya üst tarafında çapak oluşmaz, böylelikle ek bir taşlama, düzeltme işlemi gerekmez.
- Erime veya yanma riski olmaması sayesinde çok ince malzemeler kesilebilir.
- Aynı kesme donanımı ile hiçbir değişiklik yapmaksızın, yalnızca kesme hızlarını değiştirmek suretiyle bir malzemedan diğer malzemeye geçilebilir, böylelikle, özellikle fason amaçlı kesimde makine ve donanım ayar zamanları tamamen ortadan kaldırılmış olur.
- Malzeme ile kesme ucu arasındaki toleransın nispeten büyük olması sayesinde özellikle üç boyutlu kesimlerde, mesafe kontrol hatalarından oluşabilecek kesim eğrilikleri meydana gelmez.

Çizelge 2.1 Su jetinin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Yöntem	Parça Maliyeti	Hassasiyeti	İşe Başlama	Malzeme Kısıtı	Çarpılma	Kesme Yüzeyi
Su Jeti	Birim	± 0.13 mm daha yüksek	-	Yok	Yok	Düzgün
Lazer	Daha yüksek	13 mm den az kalınlıkta daha yüksek	İnce malzemede daha hızlı	Var	Var	Kaba
Plazma kesme	Daha az	Daha az	Daha hızlı	Var	Var	Kaba
Tel erozyon	Daha yüksek	Daha yüksek	%75 daha yavaş	Var	Var	Düzgün

Çizelge'de su jetinin, malzeme kısıtı ve çarpılma bakımından diğer tüm yöntemlerden daha iyi durumda olduğu görülmektedir. Malzeme kısıtı bulunmaması değişik malzemeler için yatırım yapılması zorunluluğunu ortadan kaldırmakta ve kapasite kullanım oranını iyileştirmekte ve böylece su jeti yöntemine önemli üstünlük kazandırmaktadır. (Gallagher 2002, Momber 1998)

Çarpılma oluşmaması ise masraflı son işlemler yapılması gereğini ortadan kaldırmakta ve böylece zaman tasarrufu da sağlamaktadır. Kesme yüzeyinin durumu ise tel erozyon gibidir ve yine diğer yöntemlerden üstündür. Parça maliyeti yönünden ise plazma ve alevle kesmeden daha pahalı bulunmaktadır.

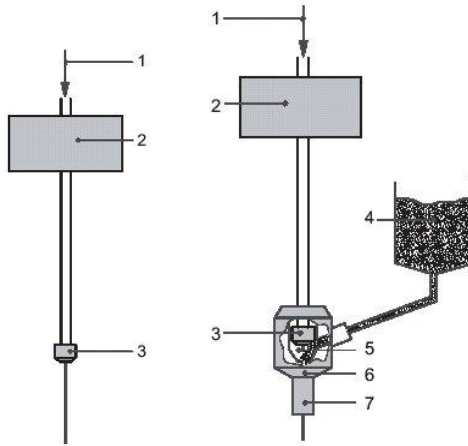
Aşındırıcılı su jeti ile saf su jeti arasındaki temel fark, su jetinin kesme gücünün artırılması amacıyla içerisine aşındırıcı malzeme eklenmesidir. Aşındırıcılı su jeti sistemi, ısı ve mekanik kısıtlamalar sebebiyle diğer yöntemlerle işlenemeyen malzemelerin işlenebilmesine imkan sağlamıştır. Sistem geniş çapta titanyum, çelik, pirinç, alüminyum, kayaç, cam, kompozit gibi birçok malzemenin işlenmesinde kullanılmaktadır. (Geren, 2001; İnt. Kyn. 3). Yüksek basınç sağlayan pompalardan sonra su jeti sisteminin en önemli parçalarından biri kesme kafasıdır. Uygulanan yöntemin türüne göre (su jeti veya aşındırıcılı su jeti) kullanılan kesme kafasının yapısı değişmektedir.

Su jeti nozul yapısı, nozul gövdesi, nozul taşı, ve nozul taşı yuvasından oluşmaktadır. Buraya gelen 4000 bar basınçtaki su nozul çıkışında yaklaşık 800-1000 m/s'lik bir hıza ulaşmaktadır.

Nozul çapı arttıkça su jetinin enerjisi de artar fakat bu hızı sağlamak için gerekli pompa basıncı da artacaktır. Basınç, su debisi ve nozul çapı arasındaki ilişkiyi gösteren tablolar mevcuttur. Genellikle uygulamalarda 0.25 mm çaplı nozullar kullanılmaktadır.

Kesme kafası nozulunun iç çapı kesme sırasında oluşacak yarığın genişliğini belirlemektedir. Odaklama tüpü de denilen bu nozulun boyu ise içindeki aşındırıcıya gerekli ivmeyi kazandırabilecek ve gerekli odaklamayı yapabilecek miktarda, içerisinden geçecek aşındırıcıya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olmalıdır. Su jeti nozulu için elmas kullanımı ve karışım odası ile odaklama tüpünün (aşındırıcı nozulu) yapıldığı malzemelerin kalitesindeki artış aşındırıcılı su jeti nozullarının ömürlerini oldukça artırmıştır.

2.1.4 Aşındırıcılı Su Jeti ile Geleneksel Su Jeti Sisteminin Temel Farkları



Su Jeti (WJ) Aşındırıcılı Su Jeti (AWJ)

Şekil 2.1 Su Jeti Sisteminin
Temel Farkları

Şekillerde;

- 1: Su girişi
- 2: Basınç ünitesi
- 3: Su nozulu (0,5-4,5 lt/dk)
- 4: Aşındırıcı besleme ünitesi
(110-170gr/lt)
- 5: Aşındırıcı giriş konisi
- 6: Karışım odası
- 7: Aşındırıcı nozulu

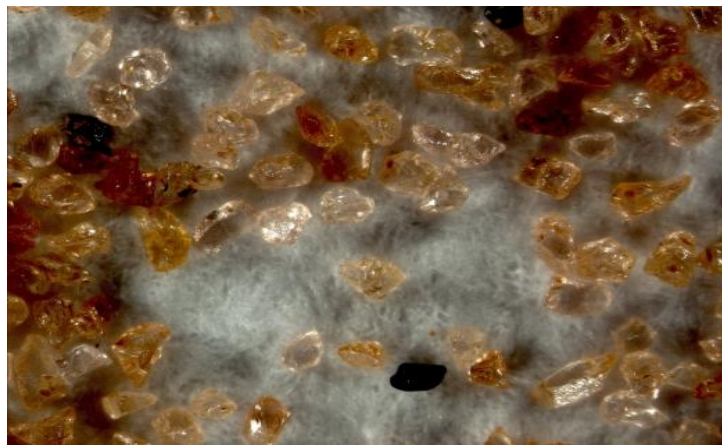
Aşındırıcı su jeti kesme kafası temel olarak su jeti nozulu çıkışına aşındırıcı eklenmesi ve böylece su jetinin kesme gücünün artırılması için geliştirilmiştir.

Kullanılan aşındırıcı malzemeler özel olarak sınıflandırılmış kuvars kumu, cam, silisyum karbür, alüminyum oksit veya granat olabilir. Silisli aşındırıcılar insan sağlığı açısından sakıncalar taşıdığından kullanımları tercih edilmemektedir. Alüminyum oksit veya silisyum karbür gibi elektrik fırını ürünü aşındırıcıların tane şekilleri ve sertlikleri kesme işlemi için uygun olsa da kullanılan kesme kafasında fazla miktarda aşınmalara yol açmaktadır. Bu tip aşındırıcılar ancak çok sert malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır.

Aşındırıcı malzemelerin yüksek kesme verimliliğine, düşük toz içeriğine ve tekrar kullanılabilirliğine sahip olması gerekmektedir.

Aşındırıcı tanelerin kesme verimi, aşındırıcıların sertliği, tane boyu ve tane şekline bağlıdır. Küresel taneler gevrek malzemelerin kesiminde daha iyi sonuçlar verirken sünek malzemelerin kesiminde keskin köşeli taneler tercih edilmektedir. (Trumpf, 1997, Babu, 2003).

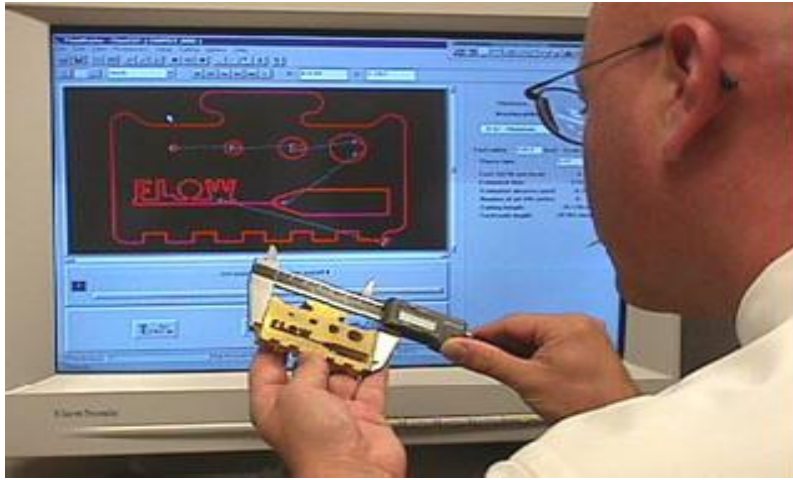
Bu şartları en iyi şekilde sağlayan granat $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$ minerali aşındırıcı su jeti uygulamalarında en geniş çapta kullanılan aşındırıcı malzeme olmuştur. Aşındırıcı su jeti kesme işlemlerinde genellikle 80 meşlik (197 Mikron) granatlar kullanılmaktadır. (Resim 2.1)



Resim 2.1 Granat Mineralinin Mikroskop Altındaki Görünüşü

Günümüzde su jeti kesme sistemlerinde hareket, kullanımı kolay bilgisayar yazılımları ile CNC kontrollü servo motorlarla gerçekleştirilmektedir. Karışım odasının aşınma miktarı, su jeti hüzmesinin eğilme miktarı, köşe ve eğimlerdeki kesme hızlarının değişimleri yine bu yazılımlarla kontrol edilebilmektedir. Veri girişi bilgisayarda oluşturulan çizimlerin CNC ye transferiyle gerçekleşir. (Resim 2.2)

Su Jeti için özel geliştirilmiş MS Windows tabanlı yazılımı CAD/CAM uygulamaları ile birlikte sunulur. Yazılım ile gerçek işleme zamanı önceden saptanır ve parça maliyeti hesaplanır. Kesilecek parçanın çizimi doğrudan tezgah üzerindeki PC ile veya ayrı bir PC ile hazırlanabilir. Parça çizimi, malzeme kalınlığı ve istenilen kesim kalınlığı girildikten sonra, makine parametrelerini kendi ayarlar ve kesimin en uygun şekilde gerçekleşmesini sağlar. Kesim esnasında bir sonraki uygulama için çalışma yapılabilir.



Resim 2.2 Su jeti sisteminde CAD/CAM uygulaması

CAD/CAM yazılımı tüm standart CNC kumanda sistemleri ile çalışabilir. AutoCAD tabanlı ve kullanıcı dostu yazılım malzemeye ve çizime göre otomatik olarak kesim hızını ayarlar ve kesimin optimal süre içerisinde olmasını sağlar.

Yazılımın içerisinde birçok malzemeye ait gerekli parametreleri içeren bir veri tabanı vardır. Kullanıcılar yaptıkları kesim uygulamaları ile elde ettikleri parametreleri de bu veri tabanına ekleyebilirler.

Yazılımın içinde malzemenin efektif kullanımı için otomatik yerleştirme programı standart olarak bulunmaktadır.

2.1.5 Yüksek Basınç Su-Jeti Çıkışı

Su jeti kesme sistemleri, basınç arttırma yöntemlerinden bağımsız olarak yüksek basınç çıkışına yerleştirilen lüle veya nozula göre sırasıyla aşındırıcısız veya aşındırıcılı sistemler olarak adlandırılırlar. Aşındırıcısız sistemlerde yüksek basınçlı su, çapı 0.25mm ile 0.40 mm arasında değişen safir veya elmas lüleden yüksek hızla itilir. Aşındırıcılı sistemlerde ise lüleden çıkan bu su jetine, lüle çıkışında, değişik çaplarda aşındırıcılar eklenir. Aşındırıcılar, karıştırıcı adı verilen kısımda karıştırılır ve karışım tekrar odaklanabilmesi amacıyla odaklama tüpü adı verilen tüpten geçirilerek dışarı atılır. Lüle, karışım ve odaklama tüpü gibi elemanlardan oluşan kesici kısım ise nozul olarak adlandırılır. Suya aşındırıcı katkısının temel nedeni suyun sahip olduğu kesme kabiliyetini arttırmaktır. Bu yöntem, aşındırıcılar yardımıyla kontrollü olarak hızlandırılan bir erozyon yöntemi olarak da açıklanabilir. Aşındırıcılı sistem kesme kabiliyetinin yüksek oluşu nedeniyle katmanlarına ayrılmayan malzemeler hariç hemen tüm malzemelerin işlenmesinde kullanılabilir. Aşındırıcısız sistemler ise daha düşük mukavemetli (tekstil ürünleri, sentetik elyaf, gıda ürünleri, plastik, tahta, kağıt, termoplast vb.) malzemelerin işlenmesinde kullanılırlar.

Aşındırıcılı sistemlerde özel olarak şekillendirilmiş ve sınıflandırılmış, silis (kuvars) kumu, silisyum karbid (karbür), cam, çelik, titanyum ve grena (garnet) taşı tanecikleri kullanılır. Silisin akciğer kanserine neden olduğu bilindiğinden silis içerikli aşındırıcıların özellikle tercih edilmemesi tavsiye edilmektedir (Geren 1998). Ayrıca, aşındırıcılı sistemlerde yeniden kazanım üniteleri kullanılarak aşındırıcı maliyetleri düşürülebilmektedir (Waterjet Abrasive Receiving Dispenser).

Aşındırıcı kullanımı dışında, sistemin kesim karakteristiğini geliştirmekte tercih edilen diğer bir işlem ise, suyun hidrojen molekülleri arasında kuvvetli hidrojen bağları oluşturarak jetin lüle çıkışında hemen dağılmasını önlemek için suya polietilen türü polimerler (yapıştırıcılar) ekleme işlemidir. Çünkü, bu tür yapıştırıcılar kullanılmadığı

taktirde, 1000 - 1200 bar basınç altında çalışan bir sistemde, lüleden dış ortama çıkan bir su jeti hüzmesi yaklaşık 50-60 cm mesafede buharlaşarak dağılmaktadır . Bu çabuk dağılma, kesim sırasında jetin, kesilecek malzemeyle odaklanma mesafesinin kısa tutulması gerektiğini gösterir. Kesilecek malzemenin lüleye çok yaklaştırılması geri basınca neden olacağı için makul bir çözüm olarak kabul edilmemektedir. Bu nedenlerden dolayı, 1000 barın üzerinde çalışan gıda sektörü dışında kullanılan aşındırıcısız veya az aşındırıcı katkılı sistemlerde, süper-su (super-water) adı verilen özel katkılı su kullanılması veya suya polietilen türü polimer ilave edilmesi önerilmektedir (Geren 1998, Hashish 1997)

Kısaca özetlenirse, kullanılan nozul tipi kesilmesi istenilen parça tipi ile ilişkilidir. İçerik olarak hemen her tür malzemeyi içerse de, su jeti sistemlerinin işleyemediği özel amaçlar için imal edilmiş çok sert seramikler, elmas ve benzeri aşırı sert malzemeler de bulunmaktadır (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2 Kesilecek Malzemeye Bağlı Olarak Kullanılabilecek Nozul Tipleri.

Su jeti nozulu ile kesilebilecekler	Aşındırıcılı su jeti nozulu ile kesilebilecekler	
Yumuşak lastik / kauçuk	Sertleştirilmiş takım çeliği	Plastik
Sünger	Titanyum	Nylon
Folyo gibi çok ince malzemeler	Alüminyum	Grafit
Plastik tabanlı halı	Sert lastik	Seramiklerin hemen hepsi
Kağıt, mukavva kutu ve benzerleri	Pirinç	Karbon fiberi
Yumuşak sızdırmazlık contaları	Bakır	Kompozitler
Mum	Egzotik malzemeler	Granit
Çocuk alt bezleri	Yumuşak çelikler	mermer
Yumuşak veya ince ahşap	Paslanmaz çelikler	Taş
Tüm yumuşak malzemeler ve benzeri malzemeler		Sert ve kalın ahşap
		Cam ve kurşun geçirmez cam

Nozul genellikle kullanılan makine tipinden bağımsız olup, istenildiğinde değiştirilebilmektedir. Komple su jeti nozullarının fiyatı 500 ile 1000 dolar arasında değişirken aşındırıcı nozulların fiyatları 800 ile 2000 dolar arasında değişmektedir. Ayrıca, aşındırıcı nozul kullanan sistemler, fiyatları 500 ile 15000 dolar arasında değişen aşındırıcı besleme sistemlerine ihtiyaç duyarlar (Geren, N 1998). Bu nedenle de aşındırıcı sistemlerin ilk yatırım maliyetleri yukarıda belirtilen farklara bağlı olarak artmaktadır.

2.2 Kullanım Alanlarına Uygun Su Jeti Kesme Sistemi Seçimi

Su jeti kesme sistemleri, sağladıkları avantajlardan dolayı, sanayide çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur (Miller 1994). Bu alanlar Çizelge 2.3’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 Su Jeti Sistemlerinin Kullanım Alanları.

Yoğun Kullanıcı Sektörler	Diğer Kullanım Alanları
Gıda sektörü, Kağıt ve mukavva sanayi, Tekstil ve giyim sektörü, Kauçuk ve plastik sanayi, Temizlik sektörü, Ayakkabı ve deri sektörü, İzolasyon uygulamaları, Cam, mermer, granit, ve seramik sektörü, Metal işleme sektörü, Elektrik-elektronik sanayii, Otomotiv sektörü, Uzay ve havacılık sanayi	Riskli alanlarda ve patlayıcı ortamlarda kesme işlemleri, Nükleer ve elektrik santralleri, İnşaat sektörü ve dekoratif mimari uygulamalar Maden sektörü, Basın-yayın, Kimya ve tıp alanları, Yol bakımı, taş ve beton kesme işleri. Gözlük camı, güvenlik camları, katlı (kompozit) camlar.

2.2.1 Gıda Sektöründe

Su jeti kesme sistemi ile, taze, kuru, paketlenmiş ya da dondurulmuş hemen tüm gıdalar işlenebilmektedir. Kesim sırasında, ürün kesici metale yapışmadığı için ürün üzerinde minimum basınç etkisi gözlenir böylece ürünün deforme olması önlenmiş olur. Bıçak temizleme, bıçak eğeleme ve bıçak değiştirme problemleri yoktur. Sistem oldukça sıhhidir. Sistem esnek imalat ve otomatik imalat sistemlerine kolaylıkla adapte edilebildiği için ürüne bıçakla verilmesi mümkün olmayan şekiller kolaylıkla verilebilir. Örneğin dondurulmuş balıkların paketlenmesi için yapılan kesme işleminde, su jeti kesme sistemi kullanıldığında ürün kaybının, normal yöntemlerle yapılan kesme işlemlerinde oluşan kayıplardan yaklaşık %20 daha az olduğu görülmüştür (Miller 1998). Su jeti kesme sistemlerinin gıda sektöründeki uygulamalarında pompalı ve aşındırıcısız sistemlerin kullanımı uygundur.

2.2.2 Kağıt ve Mukavva Sanayinde

Su jeti kesme sistemleri, özellikle karton kutu imalatında, buruşmaya, kenarların yırtılmasına ve katların açılmasına neden olmadığı için tercih edilmektedir. Sistemin en büyük özelliği, mekanik sistemlerin kesim sırasında malzemede yarattığı tahribatı yok etmesidir. Çünkü mekanik işleme sırasında katlanma ve yırtılma yaklaşık 0,5 mm olurken, bu yırtılma, su jeti sistemleri ile 0,1 mm'ye indirilmiştir. Ayrıca; kesim esnasında gözlemlenebilir nem artışı yaratmaz ve toz oluşturmaz; yüksek operasyon hızlarına ulaşabilir; İmalat sırasında sistemi bloke etmez veya kilitlemez (Miller 1998).. Su jeti kesme sistemlerinin kağıt ve mukavva sektöründeki uygulamalarında pompalı sistemlerin kullanımı uygundur. Kalın kağıt veya kağıt topu yüksek kesme hızlarında kesilecek ise aşındırıcılı sistemler aşındırıcısızlara tercih edilebilir.

2.2.3 Tekstil ve Giyim Sektöründe

Kumaş, esnek ve yumuşak bir malzeme olduğu için, beslenmesi ve kesilmesi geleneksel yöntemlerle oldukça zordur. Çünkü kumaşla temas halindeki kesici kalem kesimi

güçleştirir. Su jeti kesme sisteminde, kesici jet ile kumaş temas halinde olmadığı için işlem basitleşmekte ve hızlanmaktadır. Geleneksel kesicilerle daha doğrusal kesimler yapılabilirken, su jeti kesme sistemiyle daha kompleks ve çok katlı kumaşlar daha hassas işlenebilmektedir. Farklı modeller ve kalıplar arasındaki geçiş bilgisayar kontrollü sistemlerle daha kolay olmakta ve işlem hızı, kesici uç değiştirme gibi bir problem söz konusu olmadığı için oldukça artmaktadır. Bu sektörde çok yüksek basınçlara çıkmak gerekmediği için pompalı ve aşındırıcısız sistemlerin kullanımı uygundur. Kesme hızının artırılabilmesi amacı ile bazı uygulamalarda polimer katkı su-jeti de kullanılabilir.

2.2.4 Kauçuk ve Plastik Sanayinde

Su jeti kesme sistemleri, tüm gözenekli, taneli, ve yumuşak malzemelerin işlenmesinde kullanılabilir. Uygun lüle hareketiyle malzemeyi üç boyutlu olarak işlemek mümkündür. Özellikle, kapı ve pencere imalatında kullanılan PVC türü malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, cam takviyeli plastik, kauçuk, folye, flexiglas, neopren (10 mm kalınlığındaki neopren 1200mm/dak da), sünger (80 mm kalınlığındaki sünger 1000mm/dak da) ve makralon gibi plastik ve türevleri olan malzemeleri de yüksek hızlarda kesebilmektedir (Miller 1998). Bu tip uygulamalarda tüm plastik türevleri kesilmek istenirse pompalı aşındırıcılı sistemlerin seçilmesi yüksek kesme hızlarında kesim yapmaya olanak tanıdığı için çok ekonomik kesim yapma avantajı sağlar.

2.2.5 Temizlik Sektöründe

Su jeti sistemleri, endüstriyel temizleme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Büyük eşanjörlerin kireçlenmiş iç yüzeylerinin temizlenmesi, zamanla paslanan ya da kararan anıt ya da büstlerin temizlenip parlatılması, çakıl taşlarının topraktan ayrılmasında (taş kırma tesislerinde), kömürün kömür tozlarından ayrılması işleminde (kömür ocaklarında) kullanılmaktadır. Su jeti sisteminin temizlik işlerinde kullanılabilmesi için

lüle çapının büyütülmesi ve sistem debisinin artırılması gerekmektedir. Bu işler için en uygun sistem yüksek debili pompalı sistemlerdir. Temizlenecek malzemenin sertliğine bağlı olarak aşındırıcı kullanımına geçilebilir. Örneğin yüzeylerden epoxy kaldırmak istenirse aşındırıcılı sistem kullanımına geçilebilir. Ayrıca, kullanım yerine bağlı olarak elektrik motoru veya içten yanmalı motorla tahrik edilen sistemlerin kullanımına karar verilmelidir.

2.2.6 Ayakkabı ve Deri Sanayinde

Su jeti kesme sistemleri ayakkabı ve dericilik sektöründe kullanıldığında, malzeme sarfiyatında %15'lik bir düşüşe neden olmaktadır (Miller 1998). Ayakkabı kalıbı hazırlama masrafları, bu işlem için gerekli zaman kaybı ve kalıp hazırlarken meydana gelecek malzeme sarfı bu şekilde en aza indirilmektedir. Yüksek kesme hızı için pompalı, polimer katkılı sistemlerin kullanılması uygundur.

2.2.7 İzolasyon Uygulamalarında

Sistem, özellikle, tavan ve taban döşemelerinde kullanılan cam yünü malzemelerinin işlenmesinde kullanılmaktadır. İzolasyon malzemesi imalatçıları su-jeti sistemi kullanımı ile geleneksel kesme yöntemlerine oranla %12 oranında malzeme sarfının azaldığını tespit etmişlerdir. İzolasyon uygulamalarında kullanılacak en uygun sistem pompalı sistemlerdir. Aşındırıcı olarak polimer veya aşındırıcısız süper-su kullanılabilir.

2.2.8 Cam, Mermer, Granit ve Seramik Sektöründe

Cam, mermer, granit ve seramik türü malzemelerin en büyük özelliği kırılğan olmalarıdır. Geleneksel yöntemlerle yapılan işlemler sırasında, malzemeler çok kolay deforme olmakta ve yüksek oranlarda hurda oluşmaktadır. Bu nedenle, sektör, su jeti ile kesme sistemlerinin çok avantajlı kullanım alanlarından birini oluşturmaktadır. Su jeti

kesme sisteminin, işlem sırasında malzeme üzerine gelen kesme kuvvetlerini azaltarak malzeme deformasyonunu önlediği ve malzeme sarfını oldukça düşürdüğü tespit edilmiştir. Cam, mermer, granit ve seramik sert malzemeler olduğu için özellikle aşındırıcılı sistemler tercih edilmelidir. Cam, mermer ve granit türü malzemelerin kesimi için pompalı sistemler tercih edilirken, seramik için istenilen yüzey kalitesine bağlı olarak çift-etkili veya fazlı-çift-etkili basınç yükseltme tekniklerini içeren sistemler kullanılmalıdır.

2.2.9 Metal İşleme Sektöründe

Yüksek sıcaklık, malzemelerin mekanik özelliklerini değiştiren önemli bir etkidir. Isıl artış, tüm malzeme işleme yöntemlerinde prosesin ayrılmaz bir parçasıdır. Bu artış, malzemenin soğuması sırasında iç gerilmelere sebebiyet vererek tasarımları olumsuz yönde etkiler. Su jeti ile kesme sistemleri bu tür bir ısı artışına neden olmadığı için (işlem esnasında sıcaklık maksimum 60 °C'ye kadar çıkmaktadır), metal işleme sektöründe özellikle tercih edilmektedir. Kısa süreden beri freze tezgahlarının yaptığı işlemleri, yapabilmekle birlikte, yakın zamanda konvansiyonel takım tezgahlarının yerini alacaktır (Miller 1998). Ayrıca sistem, tüm dökümlerin (kokil döküm, investment döküm, çelik döküm ve diğer metal dökümler) işlenmesinde kullanılmaktadır. Metal kesme endüstrisi için genel bir çözüm yoktur.

2.2.10 Elektrik-Elektronik Sanayinde

Su jeti kesme sistemleri, elektronik sektörde, lider elektronik kart ve bilgisayar üreticileri tarafından kullanılmaktadır. Sistem, tüm elektronik kart malzemeleri üzerinde denenmiş ve üretim hızını önemli ölçüde artırdığı, kesme yüzey kalitesini iyileştirdiği ve toz oluşumunu elimine ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, kesme işlemi için malzemelerde bir başlangıç deliğine gerek yoktur. Epoxy-glass, kompozit, polyamid ve kevlar türü elektronik kartlar üzerine yapılan, vibrasyon, mekanik şok, termal şok, ve nem infiltrasyonu testlerinde, su jeti ile kesme yöntemiyle işlenen kartta, dielektrik sabiti,

hacmi, yüzey geçirgenliği, dağılma faktörü ve dielektrik kesme katsayısı gibi karakteristik özelliklerinde herhangi bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu sektörde kullanılan kart malzemelerini kesebilecek en uygun sistemler aşındırıcı pompalı sistemlerdir. Aşındırıcı olarak süper-su veya polimerler kullanılabilir.

2.2.11 Otomotiv Sanayinde

Su jeti ile kesme sistemleri otomotiv sektöründe oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Sistem halı, araba ön paneli, gösterge panosu, fiberglas yaylar, yakıt tankı korumaları, koltuk arkalıkları ve asbestos fren balataları gibi metal, kompozit ve metal olmayan malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. Otomotiv sanayiinde de çözüm, kesilmesi düşünülen malzeme tipi veya tipleri, arzu edilen kesme hızı ve kalitesine bağlı olarak değişebilmektedir. Fakat bütün metal uygulamaları için en uygun kesme özelliklerini aşındırıcı sistemler vermektedir.

2.2.12 Uzay ve Havacılık Sektöründe

Aramid (kevlar) destekli kompozit parçaları ve titanyum gibi malzemeleri yoğun şekilde kullanan uzay ve havacılık firmaları su jeti kullanımı ile üretkenliklerinin %80 oranında arttığını ve üretim süresinin %15-%20 oranında düştüğünü belirtmektedirler (Ramulu 1993). Bu sektör de kullanılacak su jeti sistemlerinde fazlı çift etkili basınç yükselticilerin bulunması ve aşındırıcı kullanımı gerekmektedir.

2.3 Su Jeti İle Kesme İşleminin Amacı

Özellikle son yıllarda, sağladığı üstünlükler, esnek imalat sistemlerine olan gereksinme ve su-jeti sistemlerinin esnek imalata uyumluluğu su jeti kesme sistemlerinin gelişmiş ülkelerde kullanımını yaygınlaştırmıştır. Su jeti sistemlerinin yapısı ve temel elemanları, kesilecek malzeme türü, kalınlığı ve istenen yüzey kalitesine bağlı olarak farklılıklar

göstermektedir. Ulusal ve uluslar arası rekabetin her geçen gün arttığı bir ortamda en uygun seçimin yapılması gittikçe önem taşımaktadır.

Su jet (WJ) prosesi, temel olarak tahta, kağıt, deri ve köpük gibi metal olmayan malzemelerin kesiminde kullanılmaktadır. Fakat, mermer, seramik ve paslanmaz çelik gibi sert malzemelerin kesiminde verimli değildir. Aşındırıcılar su jet ile karıştırılınca, Aşındırıcı su jet (AWJ), yeni ve daha güçlü bir proses oluşur. Her iki proses de, suyun çok yüksek basınca çıkarılması ve çok küçük bir delikten (orifice) çıkması prensibini kullanmaktadır. Giriş suyu tipik olarak 20,000 – 55,000 psi basıncı arasında değişmektedir. Bu, nozuldaki 0,15 – 0,4 mm arasında değişen çaptaki çok küçük bir delikten geçerek çok yüksek hıza ulaşır. Aşındırıcı jet işlemi, aşındırıcı taneciklerinin sert malzemeleri kesebilecek hıza çıkmasını sağlamak için aynı su jetini kullanır. Aşındırıcı etkisiyle, her sertlikteki malzeme parçalanmadan ve termal olarak bozulmadan, aynı zamanda çok yüksek kesme oranıyla kesilebilir. Kesme oranı, besleme oranı, nozul ve malzeme arasındaki mesafe (stand-off), su jeti basıncı veya aşındırıcı parametrelerinin ayarlanmasıyla kontrol edilebilir.

Her iki proseste de temel kesme mekanizması, erozyondur. Sistemin ana ekipmanları, yüksek basınç pompası (basınç jeneratörü), su jet, aşındırıcı besleme sistemi ve aşındırıcı nozul'dur. Su jeti sistemleri endüstriyel uygulamalarda kullanıldığından beri, sürekli gelişen yeni teknolojilerle beraber bu ekipmanlar da gelişmiştir. Su anda su jeti sistemlerinde kullanılan çok çeşitli dizaynlarda nozullar ve değişik marka yüksek basınç üniteler bulunmaktadır. Kesim kalitesi ve performansında, nozul ve pompa çok önemli olduğundan, bunların seçiminde titizlikle çalışılacaktır.

2.4 Su Jeti Kesme Sisteminin Bileşenleri

Kullanım yeri ve amacı, makine boyutları ne olursa olsun tüm su jeti kesme sistemlerinde bulunan iki temel bileşen mevcuttur. Bunlar; basınç üreten pompa ve suyun yüksek hızla sistemi terkettiği dar bir aralık içeren nozuldur. Yapılan işin amacına göre pompa basıncı, nozul çapı ve yapısı ve bunlarla birlikte diğer yardımcı ünitelerin yapısı da değişmektedir. Bu bölümde özellikle tez kapsamında kullanılan tipte

su jeti kesme makinaları ayrıntılı olarak incelenmektedir. Diğer makinalar da benzer yapıda olmakla birlikte bazı farklılıklar içermektedir, bunlar izleyen bölümlerde yer geldikçe anlatılacaktır.

Su jeti sistemi, saf su jeti ve aşındırıcılı su jeti olmak üzere iki temel grupta incelenmektedir. Su jeti (SJ) ilk olarak 1970’li yıllarda oluklu mukavva kesimi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, kağıt, gıda maddesi, fiberglas, yalıtım malzemeleri, bazı plastikler ve bazı kompozitleri de içeren çeşitli yumuşak/hafif malzemeler su jeti ile kesilebilmektedir.

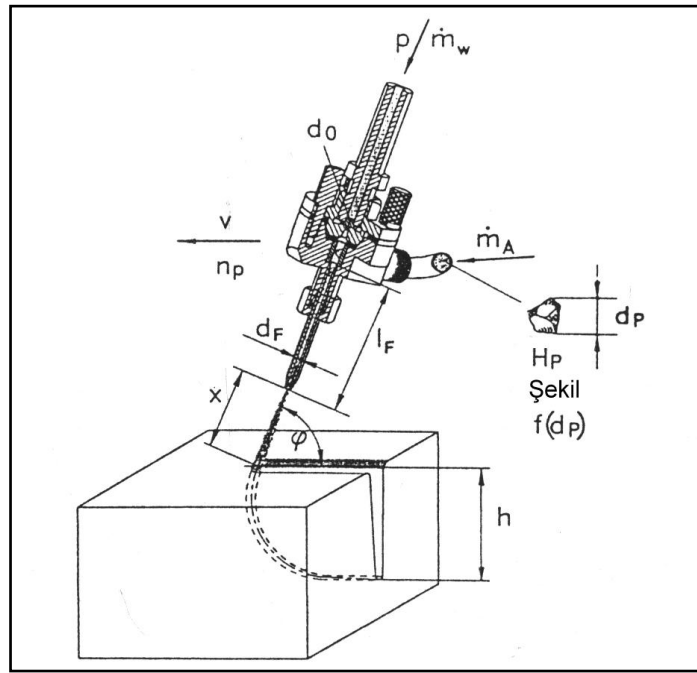
Aşındırıcılı su jetiyle kesme-işleme süreci; verimi, ekonomiyi ve tüm işlemin kalitesini belirleyen çok sayıda işlem parametresi ile karakterize edilmektedir. Bu nedenle başarılı bir uygulama için bu parametrelerin optimizasyonu temel şartlardan biridir. Aşındırıcılı su jetiyle kesme-işlemede, işlem parametreleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Momber vd.,1997; Akkurt, 2002).

Çizelge 2.4 Aşındırıcılı su jetiyle kesmede işlem parametreleri

i. Hidrolik parametreler	<ul style="list-style-type: none"> ○ Pompa basıncı (p) ○ Orifis çapı (d_0) ○ Su debisi (m_w)
ii. Kesme parametreleri	<ul style="list-style-type: none"> ○ Yanal hız (v) ○ Geçiş (paso) sayısı (n_p) ○ Durma (stand-off) mesafesi (x) ○ Kesme açısı (φ)
iii. Karıştırma ve ivmelendirme parametreleri	<ul style="list-style-type: none"> ○ Odaklama tüpü çapı (d_f) ○ Odaklama tüpü boyu (l_f)
iv. Aşındırıcı parametreleri	<ul style="list-style-type: none"> ○ Aşındırıcının kütleli debisi (m_A) ○ Aşındırıcı tane çapı (d_p) ○ Aşındırıcı tane boyu dağılımı ($f(d_p)$) ○ Aşındırıcı tane şekli ○ Aşındırıcı tane sertliği (H_p) ○ Aşındırıcının yeniden kullanılabilme kapasitesi

İşlem parametrelerinin seçimi, kesilen malzeme türüne ve istenen yüzey kalitesine göre en uygun şekilde yapılmalıdır. Bu parametreler Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmiştir.

Optimizasyon sürecinde en önemli hedef parametreler ilk olarak kesme derinliği ve sonrasında kesme hızıdır. Özel ASJ kesme uygulamalarında (tornalama, frezeleme) uzaklaştırılan malzeme hacmi de hedef parametre olabilmektedir.

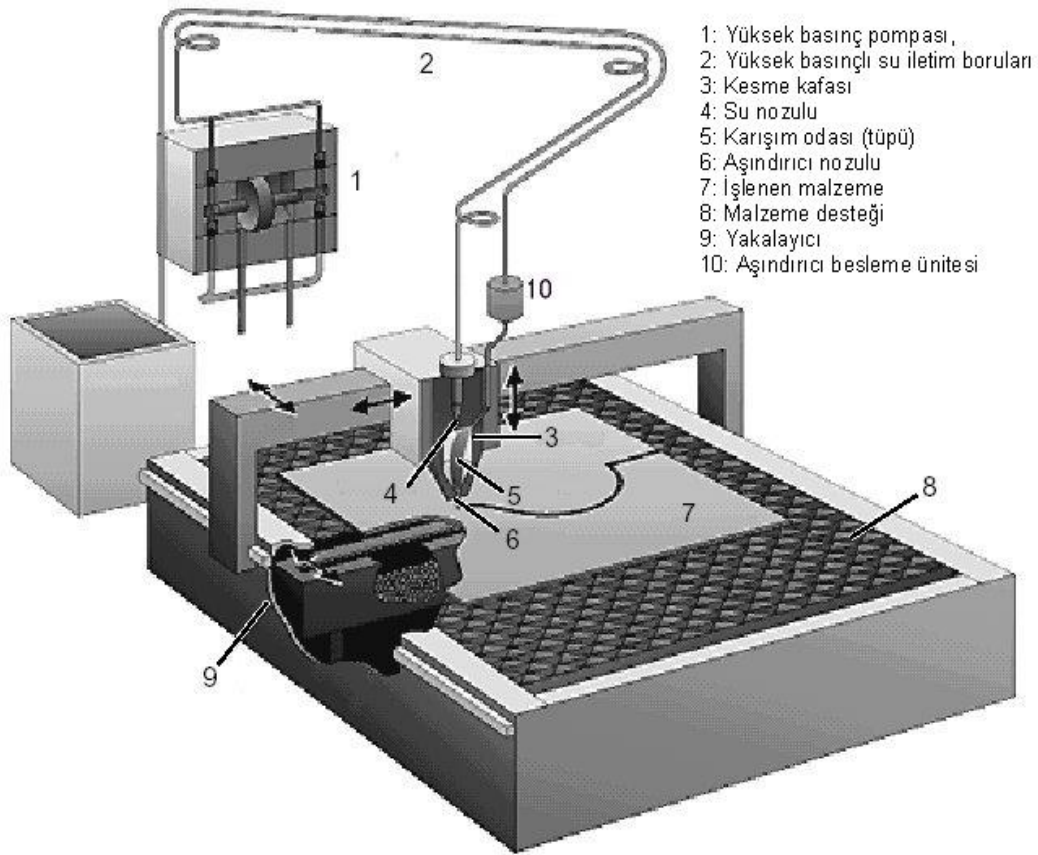


Şekil 2.2 ASJ kesiminde optimizasyon parametreleri

Aşındırıcı su jeti (ASJ) ise özellikle 1982 yılından sonra dikkat çekmeye başlamıştır (Külekçi, 2002). Aşındırıcı su jeti ile saf su jeti arasındaki temel fark, su jetinin kesme gücünün artırılması amacıyla içerisine aşındırıcı malzeme eklenmesidir. Aşındırıcı su jeti sistemi, ısıl ve mekanik kısıtlamalar sebebiyle diğer yöntemlerle işlenemeyen malzemelerin işlenebilmesine imkan sağlamıştır. Sistem geniş çapta kayalık, titanyum, çelik, pirinç, alüminyum, cam, kompozit gibi birçok malzemenin işlenmesinde kullanılmaktadır.

Genel olarak su jeti kesme makineleri; düzlemsel parçalar kesebilen 2 veya 2.5 eksenli makineler, özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılan 3 boyutlu hacimsel parçalar kesebilen 5 eksenli makineler veya su jeti ile 6 eksenli robotların birleştirilmesiyle oluşturulan kesme hücreleri olarak gruplandırılabilir.

Kullanılan su jeti kesme makinesi Şekil 2.3’de görülen, nozulun bir köprü üzerine monte edilmesi vasıtasıyla, ileri-geri, sağa-sola ve yukarı-aşağı hareketi sonucunda iki boyutta kesim yapabildiği düzlemsel kesme makinesidir.



Şekil 2.3 Düzlemsel malzemelerin kesiminde ve işlenmesinde kullanılan su jeti makinesi ve bileşenleri (Josef, R. 1996).

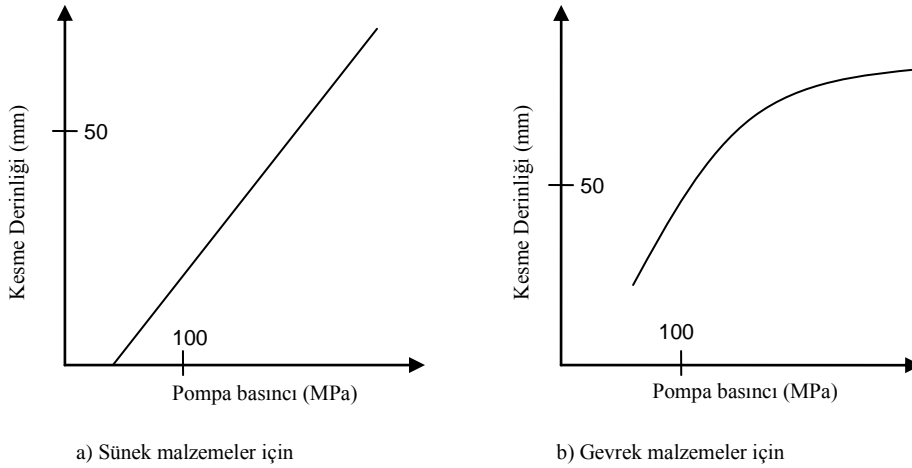
Düzlemsel parçaların kesilmesinde kullanılan makineler 4 temel parçadan oluşmaktadır. Bunlar; yüksek basınç pompası, aşındırıcı besleme ünitesi, kesme kafası ve bilgisayarlı kontrol ünitesidir.

2.4.1 Pompa Basıncının Etkisi

Tüm ASJ kesme sistemi dikkate alındığında sistemin performansını etkileyen en önemli parametre pompa basıncıdır. Pompa basıncı arttıkça kesme derinliği de artmaktadır.

Pompa basıncıyla, jet oluşumu, aşındırıcı ivmelenmesi ve malzeme uzaklaştırılması arasında yüksek ilişkiler bulunmaktadır. Pompa basıncının artmasıyla bernoulli eşitliğinden de anlaşılacağı üzere jet hızı artmaktadır. Dolayısıyla kesme derinliği de artmaktadır. Artan pompa basıncı, jetin genişlemesine ve odaklama tüpünün aşınmasına da sebep olmaktadır. Sünek ve gevrek malzemeler için artan pompa basıncının kesme derinliği üzerindeki etkileri Şekil 2.4’de görülmektedir (Momber 1997).

Pompa basıncı karışım odasında oluşan vakumu kontrol ettiği için, buraya alınacak aşındırıcı miktarını da belirlemektedir. Momentum transferi dikkate alındığında gerekli aşındırıcı kütlesini verimli bir şekilde ivmelendirmek için su jetinin belirli bir momentuma sahip olması gerekmektedir. Bunu belirlemek için farklı pompa basınçları için kesme derinliğine karşı aşındırıcı besleme miktarı grafikleri çizilir. Buradan bulunan optimum aşındırıcı besleme miktarları incelendiğinde artan pompa basınçlarıyla birlikte optimum aşındırıcı besleme miktarlarının da artış gösterdiği tespit edilmiştir.



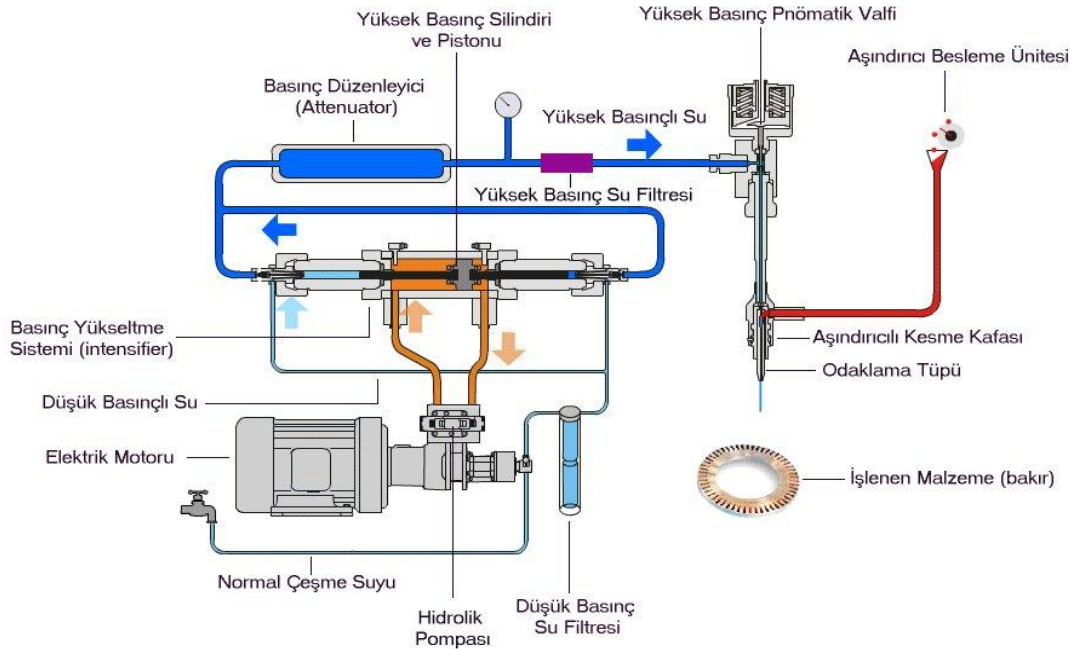
Şekil 2.4 ASJ kesiminde pompa basıncının etkisi

2.4.2 Yüksek Basınç Pompaları

Geleneksel pompalar su jetiyle kesim için gerekli yüksek basınçları üretmekten oldukça uzaktır. Su jeti üretiminde basınç yükselticili ve pistonlu olmak üzere iki farklı yapıda pompa kullanılmaktadır. Bu pompalarla 6500 bar'a kadar yüksek basınçlara çıkmak mümkün olmaktadır.

2.4.3 Basınç yükselticili pompalar

Basınç yükselticili bir aşındırıcılı su jeti kesme sisteminin şematik görünümü Şekil 2.5'de verilmiştir. Bu sistemdeki basınç yükseltici ünitesinde, birbirine merkezden bağlı farklı çaplı silindirler yardımıyla hidrolik pompa ünitesinde oluşturulan basınç, Pascal prensibi gereği, piston alanları ile orantılı olacak şekilde artırılmaktadır. Alanlar oranı, basınç yükseltme oranı olarak adlandırılır ve bu oran 20 civarındadır. Silindire giren 200 bar basınçtaki hidrolik yağın pistonu itmesiyle buna merkezden bağlı diğer piston kolu 4000 barlık su basıncı oluşturmaktadır.



Şekil 2.5 Basınç yükselticili pompa sistemi (İnt. Kyn. 1)

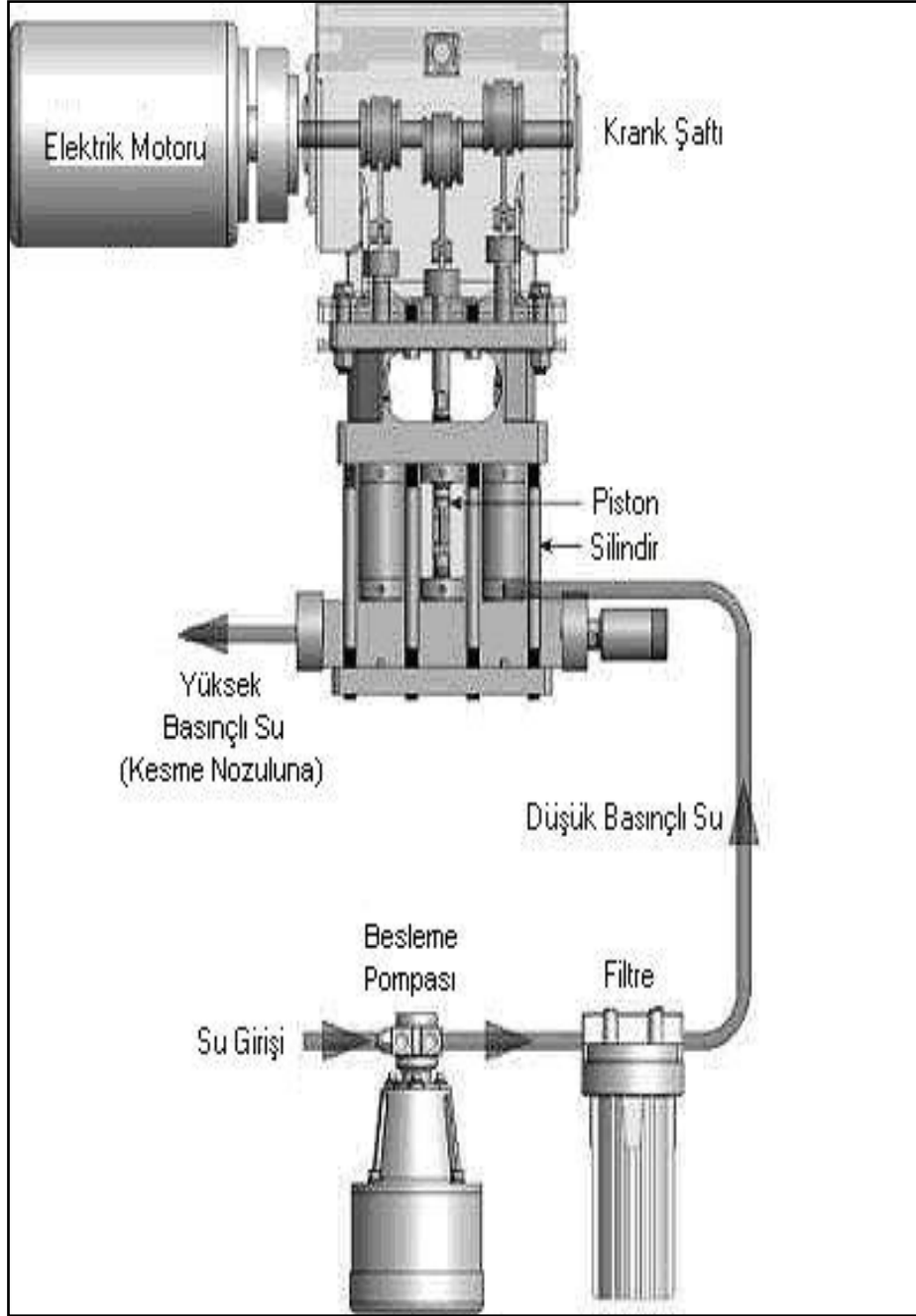
Basınç yükseltici içerisindeki silindir strokları sonuna gelen pistonlar yön değiştirdiği sırada basınçta ani düşüşler meydana gelmektedir. Bu düşüşü önlemek amacıyla, kesme kafasına gelmeden önce su basıncını dengeleyen bir depo (attenuator) yerleştirilir. Bu depo basınç değişimlerini asgariye indirerek sisteme sürekli yüksek basınçta su verilmesini sağlamaktadır.

Basınç yükseltici tipteki pompaların bu türünden başka sistemdeki basınç düşüşünü önlemek amacı için tasarlanmış daha gelişmiş türler de mevcuttur. Fazlı (kademeli) basınç yükselticili pompalar olarak adlandırılan bu tip pompaların çalışma prensibi temelde aynı olmasına karşın, sistem iki adet tek taraflı hidrolik silindir ve su silindiri içerecek şekilde tasarlanmıştır.

Her iki hidrolik silindir içerisine gönderilen yağın debisi (dolaylı olarak piston hızları) özel tasarlanmış bir manifold ile kontrol edilerek, bir su silindirindeki piston stroğun sonuna geldiğinde diğerinin stroğunun ortasında olması sağlanmaktadır. Böylece basınç düzenleyici sistemine olan ihtiyaç ortadan kaldırılarak, sistemin sürekli sabit basınç yaratması sağlanmıştır. Fakat temelde daha basit gibi görünen bu sistemin kontrolü ve kontrolü sağlayan manifoldun yapısı daha karmaşıktır.

2.4.4 Pistonlu Pompalar

Pistonlu pompalar ise Şekil 2.6'da görüldüğü gibi küçük hacimli üç veya daha fazla silindirden ve bir krank milinden oluşur, aşınmaları minimize etmek için yaklaşık 600 dev/dak'da çalıştırılırlar. Bunların çalışma prensibi pistonlu motorlarda veya pistonlu hidrolik pompalarda olduğu gibidir fakat silindir içine düşük basınçlı su alınarak, bu su maksimum 3000 bara kadar çıkarılabilmektedir. Bu tip pompalarda basınç değişimleri kesme işlemlerini etkilemeyecek kadar düşük olduğundan basınç düzenleyici sistemine gerek kalmaz ayrıca daha düşük çalışma basınçları nedeniyle de bakım gereksinimleri diğer tipe göre daha azdır.



Şekil 2.6 Pistonlu pompa sistemi (İnt. Kyn. 2)

Aşağıdaki çizelgede su jeti sistemlerinde kullanılan pompaların bir karşılaştırması verilmiştir. Çizelgeden de görülebileceği gibi düşük basınçlarda pistonlu pompaların kullanımı daha avantajlıdır. Fakat tez konusu kayaç türü malzemelerin kesimi gibi alanlarda yüksek basınçlar gerekeceğinden basınç yükselticili pomalardan birini tercih etmek gerekecektir.

Çizelge 2.5 Su jeti sistemlerinde kullanılan pompaların karşılaştırması

Etkili Faktörler	Pistonlu Pompalar (30HP)	Basınç Yükselticili Pompalar (50HP)	Kademeli Basınç Yükselticili Pompalar (50HP)
Maksimum ulaşılabilir basınç	3000 bar	3000-7000 bar	3000-7000 bar
Basınç ayar imkanı	Zor (devir sayısı değişmeli)	Kolay	Kolay
Basınç dalgalanması	Yok	150-300 bar	Yok
Basınç düzenleyici gereksinimi	Yok	Var	Yok
Çelik için yanıl hız*	120 mm/dk	108 mm/dk	108 mm/dk
Maksimum yanıl hız	120 mm/dk	Artan basınçla artıyor	Artan basınçla artıyor
Verim	Yüksek (%95)	Düşük (%70)	Düşük (%70)
Güç sarfiyatı	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yüzey kesme kalitesi	Normal	Artan basınçla artıyor	Basınç yükselticiliye göre daha iyi
Su debisi	Yüksek	Düşük	Düşük
Aşınan parçaların ömrü	Yüksek	Artan basınçla azalıyor	Artan basınçla azalıyor
Sızdırmazlık elemanı ömrü	Normal	Artan basınçla azalıyor	Artan basınçla azalıyor
Bakım gereksinimi	Düşük	Artan basınçla artıyor	Artan basınçla artıyor
Gürültü	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yatırım maliyeti	Normal	Pistonlu pompadan yüksek	Pistonlu pompadan yüksek
* 450 g/l aşındırıcı beslemesi, 0.35 mm'lik orifis kullanımı ve 3000 bar basınçta çalışılmıştır.			

2.4.5 Su Jeti Nozulları

Nozullar, su jetiyle kesme sisteminin yüksek basınç pompalarından sonra en önemli parçasıdır. Nozullar, yüksek basınç pompasından özel hortumlarla getirilen yüksek basınçlı suyun fişkırtıldığı elemanlardır.

Kullanım alanlarına göre kesme çalışmalarında kullanılan çok küçük boyutlu hassas yapılı nozullar ve temizleme, kazı-parçalama çalışmalarında kullanılan nispeten büyük boyutlu nozullar olarak iki grupta incelenebilir. Yine nozullar, saf su jeti ve aşındırıcı su jeti nozulları olarak sınıflandırılabilir. Aslında bu iki sistemin temel farkını oluşturan unsur nozul yapılarının farkından meydana gelmektedir.

2.4.5.1 Nozul Malzemeleri

İçerisinde yer alan parçacıkların çarpmalarına dayanabilmeleri için sert malzemelerden yapılmalıdırlar (Tikhoirov, Babanin, Petukhov, Starikov, 1992). Çizelge 2.6'da uygulanan yöntemle göre seçilebilecek nozul malzemeleri ve Çizelge 2.7'de ise yaygın kullanılan nozul malzemelerinin sertlik değerleri listelenmiştir;

Çizelge 2.6 Uygulanan basınca göre nozul malzemesi seçimi.

Malzemeleri	Basınç
Pirinç Çelik	< 68 MPa
Tungsten Karbür	68-170 MPa
Safir Elmas	>170 MPa

Çizelge 2.7 Nozul ve aşındırıcı malzemeleri sertlik değerleri (Labus 1991).

Nozul Malzemeleri	Vickers(Kg/mm²)	Knoop
Elmas C	8000	6000
Bor Karbür B ₂ C	2750	2250
Silikon Karbür SiC	2500	2130
Titanyum Karbür TiC	2450	2000
Alüminyum Oksit Al ₂ O ₃	2100	1650
Zirkonyum Karbür ZrC	2100	1300
Tungsten Karbür WC	1900	1200
Garnet Al ₂ O ₃ 3FOSiO	1350	920
Quartz SiO ₂	800	710
Cam Tozu	500	400

Tasarımında sert malzeme kullanılması durumunda, imalât giderleri de göz önünde tutulmalıdır. Kompleks, geometrilerde ekonomik olmayabilir.

2.4.5.2 Nozul Ömrü

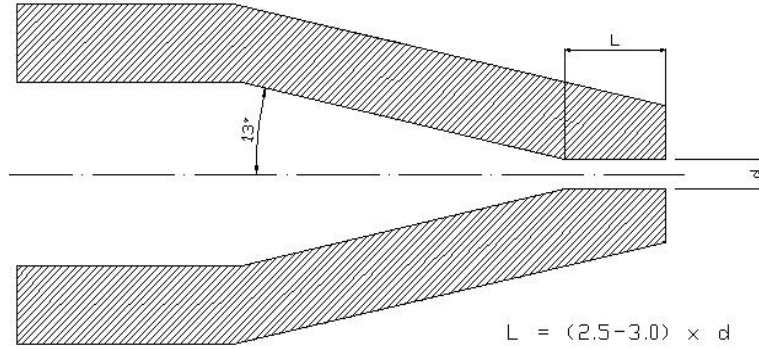
Bir su jetinin fiziksel ölçümü, jetin nozuldan ayrıldıktan sonra damlacıklara dönüştüğü mesafe esas alınarak yapılır. 50 mm'lik kesme mesafesi de jet zerrecikleri iyi bir yapışma özelliği gösterirler. Bununla birlikte genelde, nozul malzeme yüzeyi arasında müsaade edilen maksimum mesafe (stand-off) (Kesme mesafesi) 50 mm' dir. Ancak uzun zincirli bir polimerin (polietilen jet zerreciklerinin) yapışma özelliğini arttırarak daha fazla kesme alanında çalışılmasına olanak sağlar. Diğer taraftan ilave edilen yağlama etkisi, nozul ömrünü uzatır (Ansorge 1988)

Yüzey kalitesi üzerindeki en büyük etki, jetin kalitesidir. Nozul'un süreç durumunu görüntülemek için akustik sinyaller kullanılabilir, buralarda elmas nozullarının kullanılması, diğer malzemelerle yapılan çalışma ömürlerinin oldukça üzerinde çalışma ömrü sağlayacaktır.

2.4.6 Saf Su Jeti Nozulları

Saf su jeti nozullarının yapısı nozulun kullanım alanına ve amacına göre değişmektedir. Saf su jeti nozulları; düşük basınç yüksek debi nozulları, yüksek basınç nozulları ve temizleme işlemlerinde kullanılan nozullar olmak üzere üçe ayrılabilir.

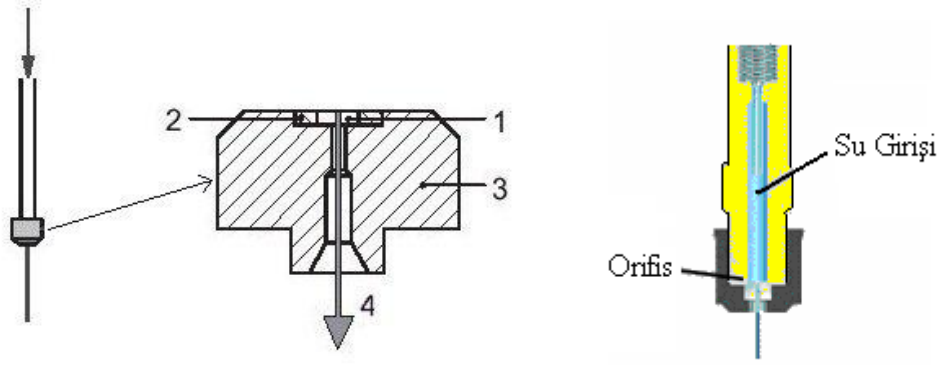
Düşük basınç – yüksek akış sisteminde en çok kullanılan nozul Şekil 2.7’de verilen “Leach and Walker “ nozuludur. Daha iyi sonuçlar veren nozullar bulunmakla birlikte imalatı kolay olan ve pratikte en çok tercih edilen Leach and Walker nozuludur.



Şekil 2.7 Leach and Walker nozulunun yapısı

Yüzeylerin istenmeyen kir, pas, boya vb. kalıntılardan temizlenmesinde kullanılan nozullar, suyu demet şeklinden ziyade sprej şeklinde yüzeylere püskürtmek amacıyla kullanılırlar. Böylece, oluşturulan daha geniş jetle daha büyük yüzeylerin temizlenmesi sağlanmış olur. Bu amaçla oval veya fan-jet nozulu kullanılmaktadır. Fan-jet nozulu geometrik olarak bir düzlem ile kesilmiş yarı küreyi andırır. Bu nozulların kesme amacıyla kullanılan nozullar kadar hassas olması gerekmez.

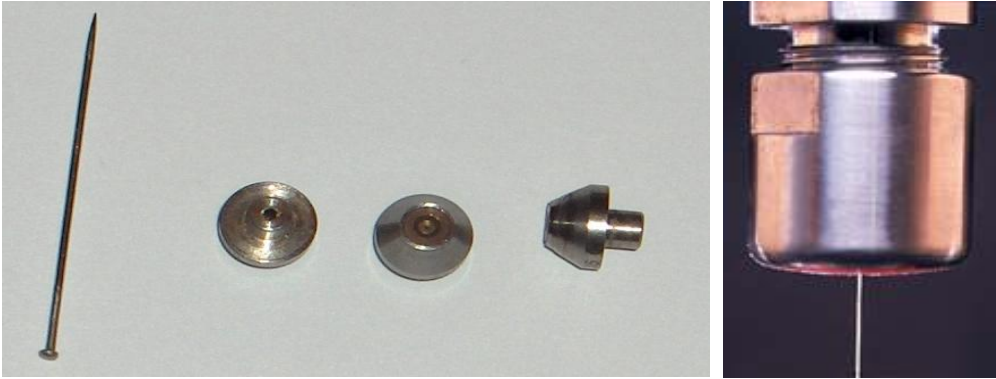
Tez kapsamında kullanılan yüksek basınç saf su jeti nozulu, Şekil 2.8’de görüldüğü gibi nozul gövdesi, nozul taşı (orifis), ve nozul taşı yuvasından oluşmaktadır. Bu tip nozullarda yüksek basınçlı fakat az miktarda su ile jet oluşturulmaktadır. Yüksek basınçtaki suyun orifis adı verilen elmas veya safirden yapılmış açıklıktan geçmesiyle su jeti oluşur.



Şekil 2.8 Su jeti nozulunun genel yapısı (Trumpf, 1997)

Burada;1: Nozul taşı (elmas, safir) 2: Nozul taşı yuvası 3: Nozul gövdesi 4: Su jeti

Şekil 2.8’de şematik olarak görüldüğü gibi jetin çıkışına doğru içinden geçtiği boşluğun çapı artmaktadır. Böylece daha düzgün bir su jeti oluşmaktadır. Orifise gelen 4000 bar basınçtaki su, nozul çıkışında yaklaşık 800-1000 m/s’lik bir hıza ulaşmaktadır. Saf su jeti oluşturmada kullanılan orifisin gerçek görünümü Resim 2.3’de verilmiştir.



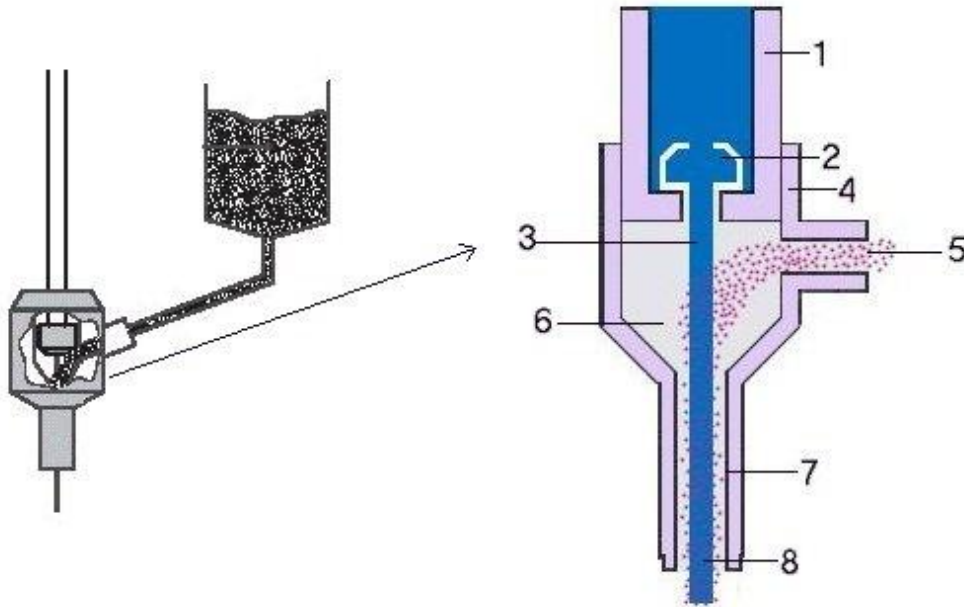
Resim 2.3 Hassas kesimde kullanılan saf su jeti orifislerinin gerçek görünümü (topluğne ölçek olarak verilmiştir) ve su jeti nozulu içinde kullanımı

Nozul malzemesi, uygulanan basınca göre değişmektedir. 68MPa basınca kadar pirinç veya çelik, 69-170MPa basınçları arasında tungsten karbür nozullar kullanılması önerilmektedir..170MPa’dan büyük basınçlarda ise safir veya elmas orifis içeren nozullar kullanılması gerekmektedir.

Nozul çapı arttıkça su jetinin enerjisi de artar fakat bu hızı sağlamak için gerekli pompa basıncı da artacaktır. Basınç, su debisi ve nozul çapı arasındaki ilişkiyi gösteren tablolar mevcuttur.

2.4.7 Aşındırıcılı Su Jeti Nozulları

Aşındırıcılı su jeti nozulları temel olarak su jeti nozulu çıkışına aşındırıcı eklenmesi ve böylece su jetinin kesme gücünün artırılması için geliştirilmiştir (Şekil 2.9).

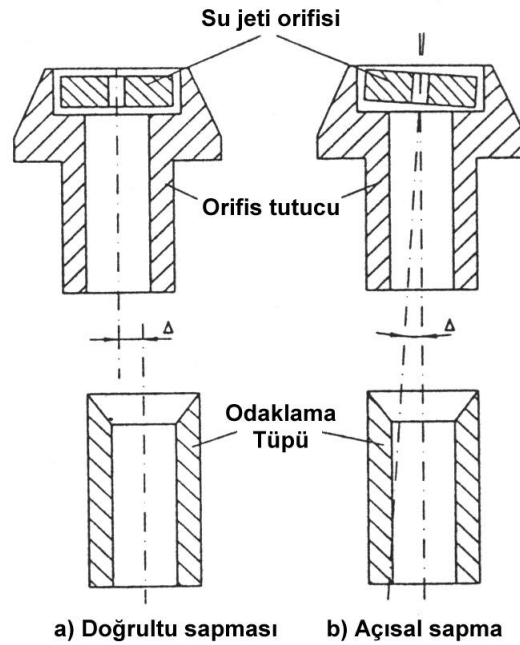


Şekil 2.9 Aşındırıcılı su jeti nozulunun genel yapısı (Trumpf, 1997)

Burada; 1: Su jeti nozulu 2: Su jeti orifisi 3: Su jeti 4: Aşındırıcılı su jeti nozulu 5: Aşındırıcı malzeme 6: Karışım odası 7: Odaklama tüpü 8: Aşındırıcılı su jeti

Aşındırıcılı su jeti nozulları temel olarak su jeti nozulu ile birlikte, karışım odası, odaklama tüpü ve aşındırıcı besleme kısmından oluşmaktadır. Kesme işleminin performansını doğrudan etkilediği için ASJ nozulunun dizaynına çok önem verilmektedir. Nozul içerisindeki karışma ve aşındırıcı girişinin verimliliğinin artırılması kesme işleminin verimliliğinin artırılmasında önemli bir etkidir. (Etchells, 1997).

Kullanılan ASJ nozullarında su jetindeki kinetik enerjinin ancak %10'u aşındırıcılara aktarılabilir. Dikkat edilecek diğer bir husus da nozul içerisinde en az aşınmaya sebep olacak şekilde tasarımının yapılmasıdır. Böyle bir tasarımda en önemli parametrelerden biri, orifis ile odaklama tüpünün merkezlerinin aynı doğrultuda konumlandırılmalarıdır. Şekil 2.10'da orifis ile odaklama tüpünün merkezleme hataları verilmiştir. Şekil 2.10.a'da eksenlerin çakışmaması, b'de ise orifisin eğri yerleştirilmesi sonucu oluşan açısal sapma görülmektedir. Böyle durumlarda nozul beklenenden çok daha önce aşınarak ömrünü tamamlayacaktır (Miranda, Lousa 1993).

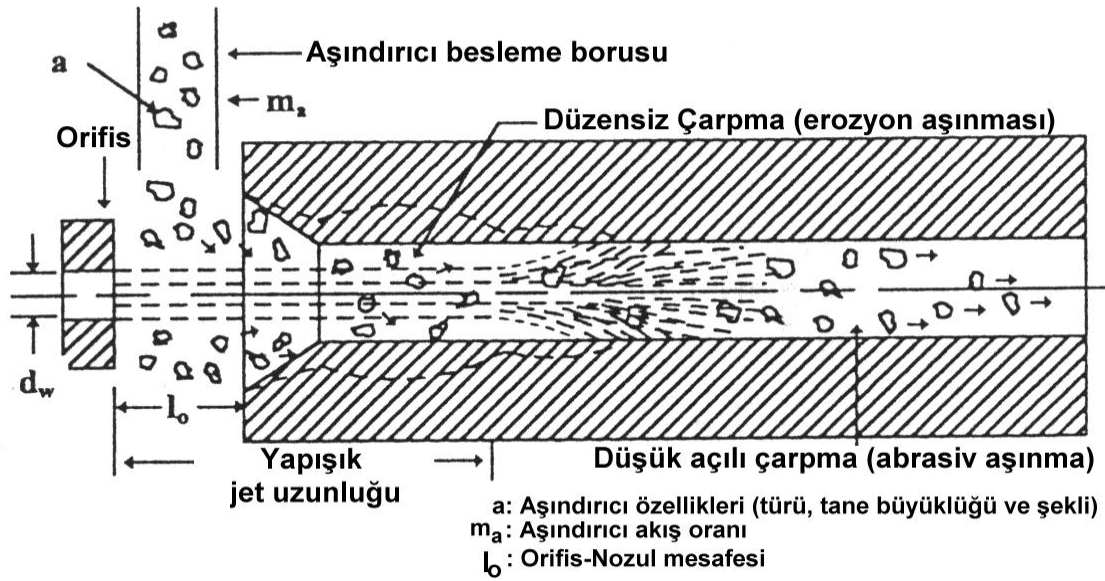


Şekil 2.10 Orifis-odaklama tüpü bağlantı hataları sonucu oluşan sapmalar

Odaklama tüpünün iç çapı kesme sırasında oluşacak yarığın genişliğini belirlemektedir. Boyu ise içindeki aşındırıcıya gerekli ivmeyi kazandırabilecek ve gerekli odaklamayı yapabilecek uzunlukta olmalıdır. Ayrıca içerisinden geçecek aşındırıcıya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olmalıdır.

DeneySEL araştırmalar sonucunda aşındırıcıların su jetine eklenmesi için farklı karışım odaları geliştirilmiştir. Bunlar aşındırıcı ilave metotları konusunda daha ayrıntılı incelenecektir. En yaygın olarak kullanılan karışım odaları yan taraftan aşındırıcı enjeksiyonu sağlayan karışım odalarıdır.

Şekil 2.11’de aşındırıcı su jeti içerisinde aşındırıcı tanelerin izledikleri yol ve odaklama tüpünde meydana gelen aşınmalar verilmektedir (Nanduri, 1995). Su jeti odaklama tüpüne ilk girdiği noktalarda yüksek açılarla tüpün duvarlarına çarpmakta ve aşınmalar bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Tüp uzunluğu yeterliyse aşındırıcı taneler daha sonra paralel hareket ederek daha düşük açılarla tüp duvarlarına çarpacaktır. Dolayısıyla tüp içinde ilerledikçe aşınmada düşüş olacaktır.



Şekil 2.11 Aşındırıcı su jeti karışımı ve odaklama tüpündeki aşınmalar
(Madhusarathi, David, Kim 1995)

Su jeti nozulu için elmas kullanımı ve karışım odası ile odaklama tüpünün (aşındırıcı nozulu) yapıldığı malzemelerin kalitesindeki artış aşındırıcı su jeti nozullarının ömürlerini oldukça artırmıştır (Etchells, 1997).

Nozulların ömürlerini belirleyebilmek için birçok çalışma yapılmış ve aşınma modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerden Taggart (2001)'a göre aşınma miktarını gösteren eşitlik aşağıda verilmektedir.

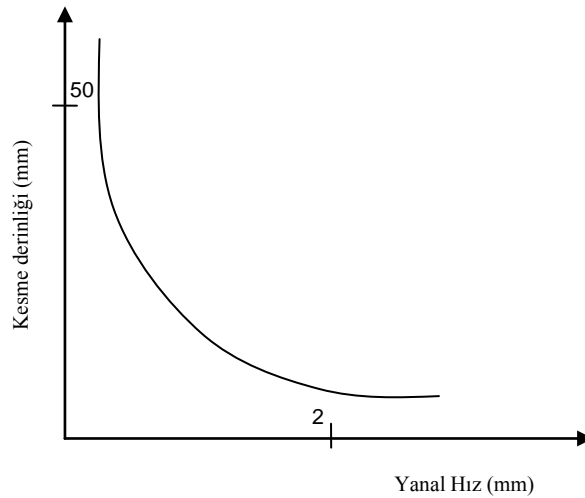
$$W_N = (8.07E - 4) \frac{P^{0.9} d_0^{0.38} m_a^{0.7}}{d_n^{0.5} L^{0.8}} \quad (5.1)$$

Swanson (1987) ve Momber(1998) aşındırıcı tanelerin ivmelenmesinde enerji kullanımı ve kinetik enerji kayıplarını incelemiştir, yine Momber (2001) bir başka araştırmasında aşındırıcılı su jeti oluşumunda karışım içindeki enerji transferlerinin verimliliğini araştırmıştır. Tazibt (1996) su, hava ve aşındırıcıdan oluşan su jetinin bileşimini inceleyerek, aşındırıcı tanenin ivmelenme sürecini bir matematiksel modelle açıklamıştır. Bütün bu çalışmalara rağmen, karışma odasındaki kompleks türbülans koşulları, karışma işlemi anlamayı oldukça güçleştirmektedir. Bu konuyla ilgili olarak özellikle üretici firmalar tarafından yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına günümüzde de devam edilmektedir.

2.5 Kesme Parametrelerinin Etkisi

2.5.1 Yanal Hızın Etkisi

Yanal hız ile kesme derinliği arasında tipik bir ilişki bulunmaktadır. Düşük yanal hızlar için kesme derinliği önemli artış gösterirken, yüksek yanal hızlarda kesme derinliği bir doyum noktasına hatta sıfır noktasına yaklaşmaktadır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 ASJ kesiminde yanal hızın etkisi

Süspansiyon ASJ ile yapılan kesme deneylerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Walters vd.,). Kayaç kesme deneylerindeki ilişkiler de aynıdır (Summers, 1981, Hagan 2000, Xiaohong 2000).

Yanal hızın kesme süreci üzerinde en önemli etkisi, maruz kalma süresini belirlemesidir. Bir aşındırıcılı su jeti tarafından iş parçasında depolanan kinetik enerji, yanal hızla ters orantılıdır. Yanal hız ile talaş kaldırma miktarı arasındaki ilişkileri ifade eden eşitlikler geliştirilmiştir. Burada talaş kaldırma miktarını maksimize edecek durum en uygun yanal hız değerini verecektir.

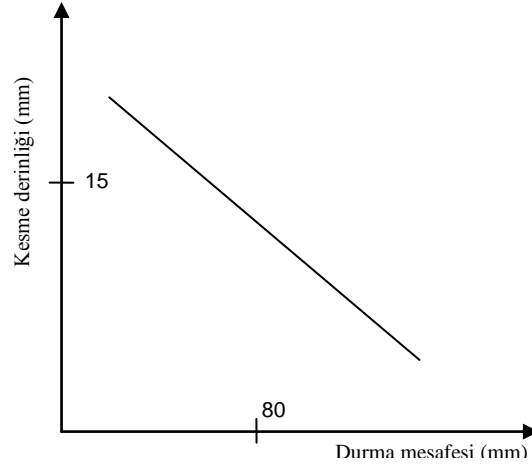
2.5.2 Geçiş Sayısının Etkisi

Geçiş sayısı veya paso sayısı, çok aşamalı kesme-işlemeyi tanımlar. Çok geçişli kesme-işlemede talaş kaldırma stratejisi, maruz kalma ve kesme derinliği arasındaki ilişkiye dayanır. Jetin bir noktaya uygulanma süresi arttıkça su birikmesi ve sürtünmeler etkisiyle kesme derinliği artışında bir yavaşlama olmaktadır. Kesme hızını yüksek tutup, kesme işlemini birkaç geçişle yapmak daha verimli olmaktadır. Kesme derinliği-uygulama süresi grafikleri incelendiğinde optimum bir uygulama süresi (t_{opt}) belirlenebilir. Optimum kesme hızı da buradan hareketle;

2.5.3 Durma Mesafesinin Etkisi

Aşındırıcılı su jetiyle kesmede, durma mesafesinin (nozül-malzeme arası mesafe) kesme derinliği üzerindeki etkisini ilk olarak Barton (1982) keşfetmiştir. Barton (1982) durma mesafesindeki artışla, kesme derinliğinde lineer bir azalma olduğunu belirlemiştir (Şekil 2.13). Blickwedel (1990), Chung vd. (1992), Kovacevic (1992) ve Guo vd. (1994) yaptıkları çalışmalarla bunu teyit etmişlerdir. Liu vd. (1992) ve Brant vd. (1994) süspansiyon ASJ ile yaptıkları çalışmalarda, Bortolussi et al. (1988), kayaçlarda yaptığı ASJ kesme deneylerinde benzer sonuçları tespit etmişlerdir.

Durma mesafesi, aşındırıcı tanelerin hızını önemli ölçüde etkilemese de, jetin genişlemesi nedeniyle kesme alanı genişleyecek ve kesme derinliği azalacaktır.



Şekil 2.13 ASJ kesiminde durma mesafesinin kesme derinliğine etkisi

2.5.4 Kesme Açısının Etkisi

Barton (1982), Oweinah (1989) ve Hashish (1993) yaptıkları çalışmalarda sünek malzemeler için oluşan kesme açıları ile kesme derinlikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çelik ve alüminyumun aşındırıcı su jetiyle kesilmesi sırasında 75-80⁰'lik kesme açılarında maksimum kesme derinliği gözlemlenmiştir.

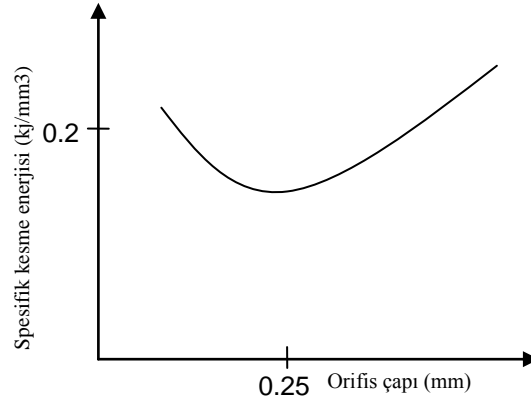
Gevrek malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarda 90⁰'lik kesme açılarında maksimum kesme derinliğinin elde edildiği tespit edilmiştir.

2.6 Karıştırma Parametrelerinin Etkisi

2.6.1 Orifis Çapının Etkisi

Orifis çapı arttıkça aşındırıcı tanelere momentum transferi daha verimli olmaktadır. Fakat çaptaki artış belirli bir limit değere ulaştıktan sonra, tanelerin hızlanmasında

önemli bir etkisi kalmamaktadır. Şekil 2.14’de spesifik kesme enerjisiyle orifis çapı arasındaki ilişki verilmektedir.

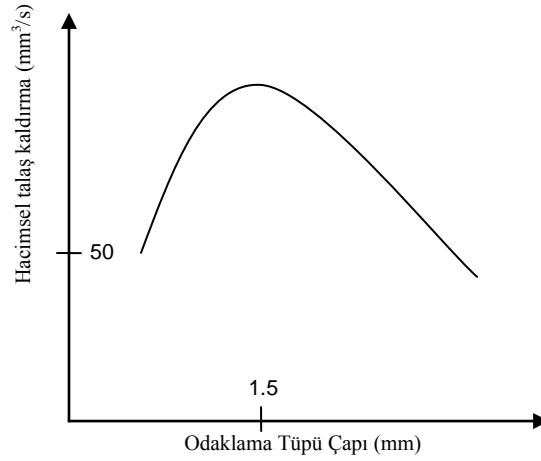


Şekil 2.14 ASJ kesiminde orifis çapının etkisi

Sınır pompa basıncı gibi kesme işlemi için aşındırıcı ivmelendirmesini sağlayabilecek sınır nozul çapından da bahsedilebilir. Optimum nozul çapı sınır çapın yaklaşık 2,5 katı olarak belirlenmiştir.

2.6.2 Odaklama Tüpü Çapının Etkisi

Genel anlamda odaklama çapındaki artış kesme derinliğinde azalmaya sebep olmaktadır. Momentum transferinde jeti oluşturan su+hava+aşındırıcı karışımı ne kadar yoğun olursa aşındırıcıya aktarılacak enerji o kadar yüksek olacaktır. Dolayısıyla aşındırıcı ivmelenmesi de o derece verimli olacaktır. Bu durum da ancak küçük odaklama tüpü çapıyla sağlanabilir. Çok küçük odaklama çapı durumunda ise aşındırıcı+hava+su jeti karışımı verimli bir şekilde gerçekleşemediği için yine aşındırıcıya istenen ivme kazandırılmaktadır. Odaklama tüpü çapı-kesme derinliği ilişkisi Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.15 ASJ kesiminde odaklama tüpü çapının hacimsel talaş kaldırma miktarına ve dolayısıyla kesme derinliğine etkisi

Araştırmacılar Şekil 2.15’de görüldüğü gibi optimum bir odaklama tüpü çapını ifade etmişlerdir. Aslında sadece odaklama tüpü çapı kendi başına bir anlam ifade etmektedir. Karışım odasındaki ivmelenme olayının verimi gelen su jetinin çapıyla da ilişkisi bulunmaktadır.

Araştırmacılar bu mantıktan hareketle odaklama tüpü çapı ile orifis çapı arasında $d_{fopt}=(3-4)d_o$ ve odaklama tüpü çapı ile tane çapı arasında $d_{fopt}=3d_p$ ilişkileri olduğunu tespit etmişlerdir.

2.6.3 Odaklama Tüpü Boyunun Etkisi

Odaklama tüpü boyundaki artışla birlikte başlangıçta kesme derinliği de doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum, enjekte edilen aşındırıcı tanelerin ivmelenmesi için gerekli mesafe ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu kritik mesafe geçildikten sonra, aşındırıcı hızında daha fazla artış gözlenmez, fakat bu durumda, yayılan su jetinin cidarlara sürtünmesi etkisiyle kesme derinliğinde bir düşmeye sebep olacak şekilde aşındırıcı hızını azaltır.

Optimum odaklama tüpü boyu veya diğer bir ifadeyle optimum ivmelendirme mesafesi büyük oranda aşındırıcı malzeme yoğunluğuyla ilgilidir. Daha ağır taneler için daha büyük mesafeler gerekecektir. AŞındırıcı tüketime açısından bakıldığında uzun odaklama tüpleri tavsiye edilmektedir.

Akışkanlar dinamiği deneyleri ve aşındırıcılı su jeti kesme deneyleri sonuçları, optimum kesme sonuçları elde etmek için, odaklama tüpü boyu ile çapı arasında aşağıdaki ilişkiyi iŐaret etmektedir:

$$L_{F_{opt}} = (25 - 50) \cdot d_F \quad (7.1)$$

2.7 AŞındırıcı Malzemeler ve  zellikleri

Nispeten daha sert ve dayanıklı malzemelerin kesilip işlenmesinde kullanılan aşındırıcılı su jetinin kesme gücünü belirleyen önemli unsurlardan biri kullanılan aşındırıcı malzemelerdir. AŞındırıcılı su jeti (ASJ) ile kesme uygulamalarında çok farklı türde aşındırıcı malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan aşındırıcı ürünlerin başında %90 gibi bir oranla granat minerali gelmektedir. Bunu, olivin, coruf, alüminyum oksit ve silis kumu izlemektedir (Martinec 1992). ASJ uygulamalarında kullanılan aşındırıcılar oksitler ve silikatlar olarak iki grupta incelenmektedir (izelge 2.8).

Çizelge 2.8 AŞındırıcı malzemelerin sınıflandırılması

Oksitler	Silikatlar	
	Granat Grubu	Diğer Silikatlar
Manyetit	Almandin	Zirkon
İlmenit	Spesartit	Topaz
Korund	Pirop	Olivin
Rutil	Grosular	Staurolit
	Andradit	Kuvars

Aşındırıcı malzemelerin seçiminde dikkat edilen en önemli hususlar; aşındırıcı malzemelerin sertliği, yoğunluğu, mekanik davranışı, tane şekli, tane boyu dağılımı ve ortalama tane büyüklüğüdür.

Bu amaçla kullanılan aşındırıcı malzemelerin değerlendirilmeleri için Agus vd. (1995) tarafından bir model geliştirilmiştir. Buna göre ASJ sistemindeki bir aşındırıcı malzemenin gücü aşağıdaki eşitlikle verilmektedir.

$$P_{abr} = H_p^{a_1} \cdot S^{a_2} \cdot \rho_p^{a_3} \cdot d_p^{a_4} \cdot m_A^{a_5} \quad (8.1)$$

Burada hesaplanan aşındırıcı malzemenin gücü ile oluşan jetin birim aşındırma kapasitesi arasında pozitif bir doğrusal ilişki mevcuttur. Eşitlikte verilen üssel katsayılar ise kesilecek veya işlenecek malzemeye göre belirlenmiş ve bir çizelge halinde hazırlanmıştır.

Çizelge 2.9 Aşındırıcı malzeme gücü eşitliğindeki katsayılar

Kesilen Malzeme	Üssel İfadeler				
	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
Granit	1.4	0.2	-0.4	0.1	-0.5
Porfirik kayaç	1.5	-0.1	-0.2	0.1	-0.5
Bazalt	1.2	0.7	-0.2	0.1	-0.5
Mermer	0.7	2.0	-0.2	0.1	-0.5

Buradan görülebileceği gibi aşındırıcı malzemenin sertliği ve tane şekil faktörü kesme işleminde en önemli etkiye sahip bileşenlerdir. Sert kayaç kesiminde aşındırıcı sertliği önemli faktörken, daha yumuşak malzemelerin kesiminde tane şekli önem kazanmaktadır.

2.7.1 Aşındırıcı Malzemelerin Yapısı

Aşındırıcı malzemelerin kristal kafes yapısı, kristal sınıfı ve simetrisi, kimyasal bileşimi, katı-gaz-mineral kapanımları, dilimlenmesi vb. konuları kapsamaktadır. Kristal yapısı, aşındırıcının kırılıp öğütülerek istenen boyutta sınıflandırılması sırasında tane şeklini belirleyen unsurlardan biri olması sebebiyle önemlidir. Diğer mineralojik özellikleri aşındırıcı tanelerin tıkkızlık ve darbe dayanımlarını belirlemede etkili olabilmektedir. Kimyasal bileşimi, sağlık ve çevre bakımından sorun yaratabilmesi ihtimali açısından değerlendirilmelidir.

2.7.2 Aşındırıcı Malzemelerin Sertliği

Sertlik, uygulamada aşındırıcı gücünü en çok etkileyen faktör olması sebebiyle çok önemlidir. Aşındırıcılar gibi gevrek malzemelerin sertliğinin belirlenmesinde iki yöntem izlenmektedir. Bunlar; Mohs sertlik değeri olarak bilinen çizik testi ve Knoop veya Vickers sertlik değerlerinde kullanılan batırma veya çentik testidir.

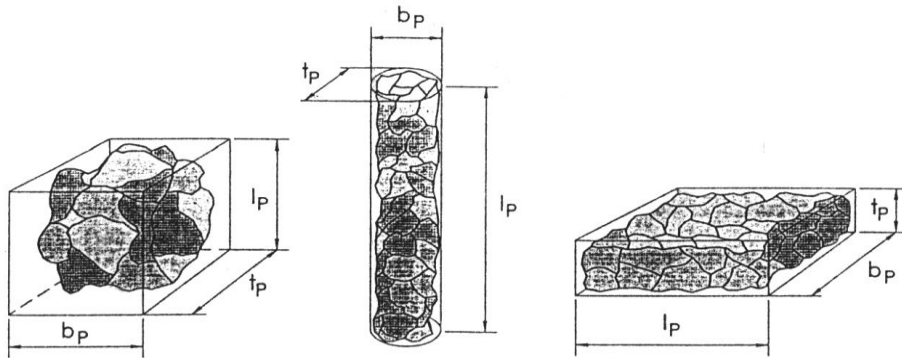
Bilindiği gibi Mohs sertlik ölçeğinde 10 mineral temel alınmıştır. Bu sıralama bir üst sıradaki mineralin bir alt sıradaki minerali çizebilmesi prensibiyle oluşturulmuştur. Knoop sertliğinde ise elmas bir piramit uç belli bir yükü, sertliği belirlenecek malzeme üzerine batırılmakta ve uygulanan yükün oluşan piramit izinin köşegen uzunluğuna bölünmesiyle de sertlik değeri hesaplanmaktadır. Knoop ve Vickers sertlikleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Diğer sertlik değerleri arasında da çeşitli ilişkiler araştırılmış ve farklı eşitlikler geliştirilmiştir.

Çizelge 2.10 Çeşitli aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri

Aşındırıcı Malzeme veya Mineral	Kimyasal Bileşimi	Mohs Sertliği	Knoop Sertliği
Elmas	C	10	8000
Kübik Boron Nitrit	BN	9.9	7800
Boron Karbit	BC	9.7-9.8	2760
Silisyum Karbür	SiC	9.5-9.6	2480
Korund	Al ₂ O ₃	9-9.4	2150
Zımpara	SiO ₂ FeOAl ₂ O ₃	7-9	1800
Demir Atım	Fe	8.5	1690
Granat	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	7.5-8	1360
Staurolit	MgFeAl Silikat	7-7.5	844
Kuvars	SiO ₂	7	820
Olivin	(MgFe) ₂ SiO ₄	6-7	690
Cam Boncuk	SiO ₂	5-5.5	515

2.7.3 Aşındırıcı Malzemelerin Şekil Özellikleri

Şekil faktörleri, tek bir aşındırıcı tanenin şeklini matematiksel olarak ifade etmek için geliştirilmiş sayılar ve eşitlikleridir. Tane şekli genellikle en, boy ve kalınlık değerlerinin birbirlerine oranları (Şekil 2.16) ve geometrik formu ile ifade edilmektedir.

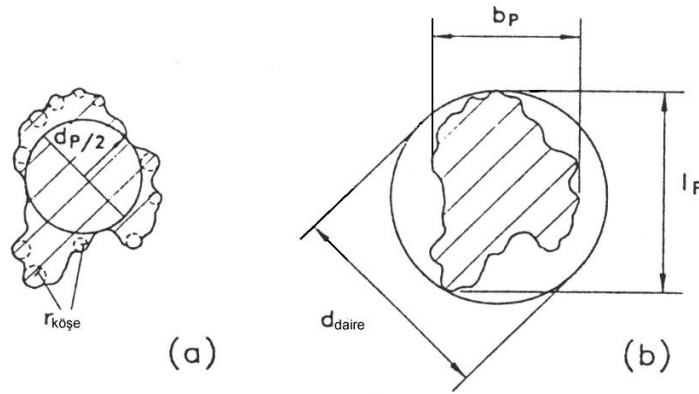


Şekil 2.16 Aşındırıcı tanelerin şekillerinin karakterizasyonunda kullanılan boy oranı ve düzlük oranı

Boy oranı: $r_e = \frac{I_p}{b_p}$ (8.2)

Düzlük oranı: $r_f = \frac{b_p}{t_p}$ (8.3)

Bahadır vd. (1990) yaptıkları bir çalışma ile tane boyu değişimi ile aşındırıcı türüne göre farklı olmakla birlikte tane şeklinde de değişiklik olduğunu göstermiştir.



Şekil 2.17 Aşındırıcı tanelerin geometrik şekil karakteristikleri

a) Küresellik b) Yuvarlaklık

Hacimsel şekil faktörü ile ifade edilen tanenin geometrik formu (geometrik şekil faktörü), tanenin ideal geometrik forma ne kadar yaklaştığının bir ölçüsüdür. Şekil faktörünün bileşenlerinden biri küresellik ölçüsüdür ve şu şekilde formülize edilmektedir.

$$S_p = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{b_p I_p}{d_{daire}}} \quad (8.4)$$

İki boyutta, kürenin izdüşüm alanından gidilerek yuvarlaklığın belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılmaktadır (Şekil 2.17). Küresellik ve yuvarlaklık değeri, çok

keskin köşeli taneler için 0'dan başlayıp ideal küresel taneler için 1 değeri arasında değişmektedir.

$$S_R = \frac{\sum \left(\frac{2r_k}{d_p} \right)}{N_k} \quad (8.5)$$

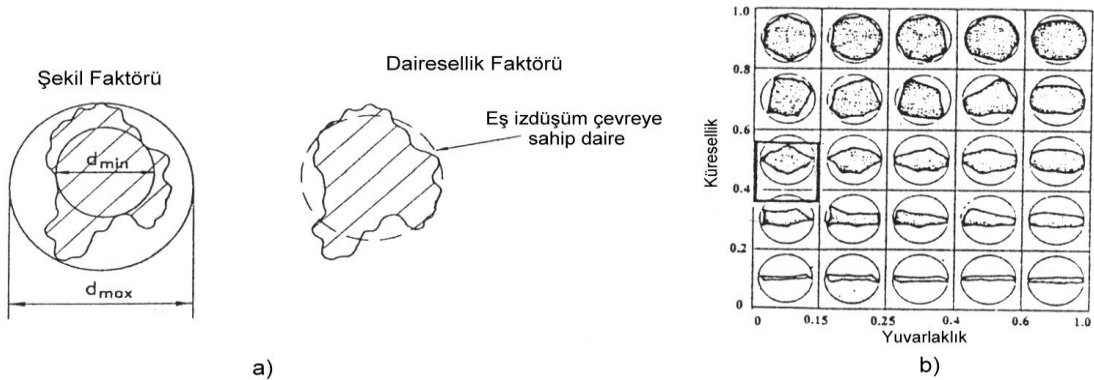
Vasek vd. (1993) aşındırıcı taneleri karakterize etmek için temelde Cox (1927) tarafından geliştirilen bir dairesellik faktörü önermişlerdir. Buna göre;

$$F_0 = \frac{4\pi p}{P_2} \quad (8.6)$$

Şekil faktörü:

$$F_s = \frac{d_{\min}}{d_{\max}} \quad (8.7)$$

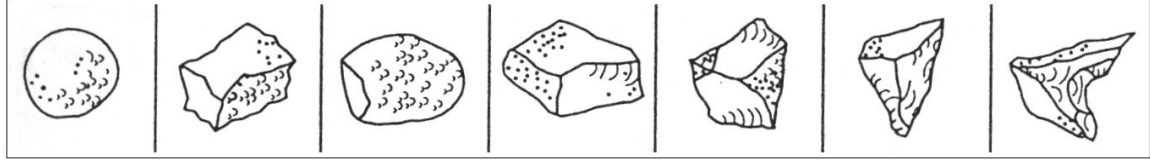
Küre için $F_0 = 1$ ve $F_s = 1$ olmak üzere bunların arasındaki değerler bir tablo halinde verilmiştir.



Şekil 2.18 Aşındırıcı tanelerin şekil karakterizasyonu

- a) Aşındırıcı taneler için yuvarlaklık-küresellik diyagramı,
- b) Aşındırıcı taneler için şekil ve dairesellik faktörü

Vasek vd. (1993) aşındırıcı granat taneleri için 7 farklı tane şekli belirlemiştir. Bunlar Şekil 2.19’da verilmiştir. Çizelge 2.11’de, granat mineral türüne göre aşındırıcı tane şekil faktörünün değişimi verilmektedir.



Şekil 2.19 Aşındırıcılı su jeti kesme işleminde kullanılan aşındırıcı granat tanelerinin tipik şekilleri (Momber, Kovacevic 1998).

Çizelge 2.11 Granat mineral türlerine göre şekil faktörünün değişimi

Mineral Türü	Alt tipi	Şekil Özellikleri	
		F ₀	F _ş
Almandin	B	0.66	0.65
	M	0.69	0.67
	K	0.68	0.66
	G	0.66	0.64
Grossular	-	0.71	0.70
Andradit	V-A	0.67	0.65
	V-B	0.68	0.68
	V-C	0.65	0.68

2.7.4 Aşındırıcı Tane Çapının Etkisi

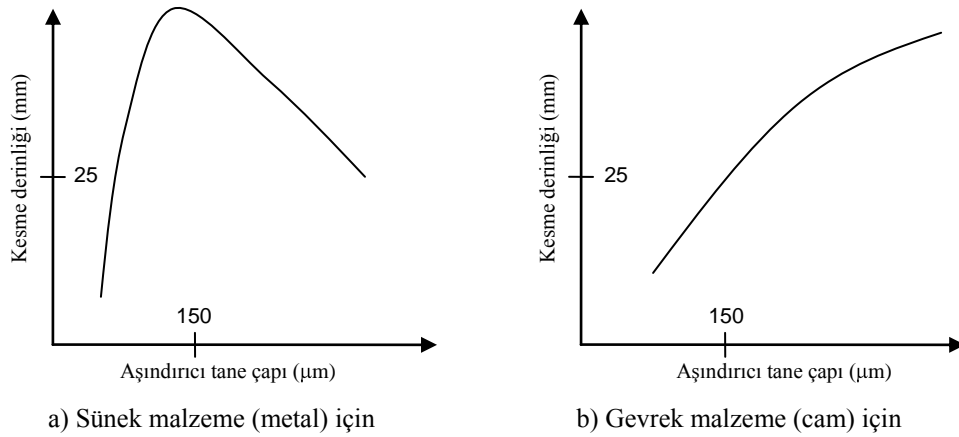
Aşındırıcı tane çapı ile kesme derinliği arasındaki ilişki aşağıdaki eşitlikle verilmektedir;

$$h(d_p) = C_{14} \cdot d_p^{C_{15}} \cdot \exp(C_{16} \cdot d_p) \quad (8.8)$$

Bu eşitlik 4 farklı aralıkta değerlendirilmektedir. Küçük parçacık çapları için C₁₅=1 ve C₁₆=0’dır. Bu şartlarda, aşındırıcı tane çapı ile kesme derinliği arasında doğrusal bir

ilişki bulunmaktadır. Bunun sebebi daha büyük tanelerin daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmasıdır ($E_k=d_p^3$). Diğer yandan, tanecik sayısı artan tane çapıyla birlikte azalacaktır. İkinci aralıkta $0 < C_{15} < 1$ ve $C_{16}=0$ 'dır. Bu aralıkta azalan darbe sayısı nedeniyle fonksiyonun gelişimi düşer. Tek bir tanenin kinetik enerjisi ile darbe yapan tane sayısı arasındaki optimum denge aşılmaktadır. Üçüncü aralıkta ise, optimum şartlar mevcuttur ($C_{15}=C_{16}=0$ 'dır) ve maksimum kesme derinliği $h_{maks}=C_{14}$ değerine ulaşılır. Bu aralığın yeri ve genişliği, işlem parametreleri kadar işlenen malzemeye de bağlıdır (Şekil 2.20). Gevrek davranış gösteren malzemeler için nispeten geniş olan aralık, malzeme grubunun darbe frekansına daha az duyarlı olduğunun bir göstergesidir. Bu aralık, kesme derinliğinde önemli bir etki oluşturmadan kesme kalitesi üzerinde etkili olmayı sağlar.

Son aralıkta aşındırıcı tane çapındaki artışla birlikte kesme derinliği azalır. Bu durum düşen darbe frekansı ve düşen tane hızlarının bir sonucudur (Nakamura vd. 1989, Gua vd.1992, Momber vd., 1996).



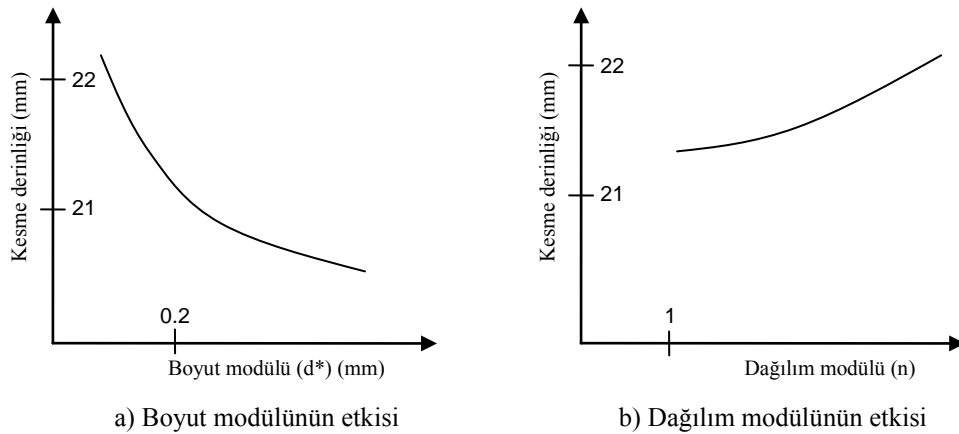
Şekil 2.20 Aşındırıcı tane çapı-kesme derinliği ilişkisi

Şekil 2.20'de verilen eğrilerin yapısı yanıl hızlara karşı oldukça duyarlıdır. Foldyna ve Fialova (1989) kaya kesme deneylerinde iri tanelerin pozitif etkisinin yüksek yanıl hızlarda tamamen ortadan kalktığını tespit etmişlerdir. Aşındırıcı tane sayısının etkili olabilmek için gereken sayıdan çok düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Aşındırıcı tane çapının kesme derinliği üzerindeki etkisi aşındırıcı debisiyle de ilişkilidir. Büyük

aşındırıcı taneler kesme derinliği için optimum aşındırıcı debisi üzerinde önemli bir etkiye sahipken küçük aşındırıcı taneler aşındırıcı debisindeki değişikliğe karşı duyarlı değildirler.

2.7.5 Aşındırıcı Malzemelerin Tane Büyüklüğü ve Tane Boyut Dağılımı

Su jetine eklenen aşındırıcılar, geniş bir aralıktaki farklı çaplarla karakterize edilirler. Genellikle, taneciklerin ortalama boyunu dikkate almak, parçacık dağılımı için sadece tek bir bakış açısını yansıtır. Daha sık olarak, böyle dağılımlar iki veya daha fazla parametre ile karakterize edilir.



Şekil 2.21 Aşındırıcı tane boyu dağılımı parametreleri-kesme derinliği ilişkisi

Momber vd.(1996), aşındırıcı tane boyu dağılımı parametrelerinin aşındırıcılı su jeti ile kesme süreci üzerindeki etkilerini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu araştırmacılar, çalışmalarında Rossin-Rammler-Sperling (RRSB) dağılımını kullanmışlardır. Sonuçta, boyut modülünün (d), dağılım modülünden (n) daha önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 2.21). Şekil 2.21, dağılım modülündeki (n) değişimin kesme derinliğinde %5'den daha az bir sapmaya neden olduğunu göstermektedir. Bunun tersine, kesiğin alt tarafındaki yüzey kalitesi, aşındırıcı tane boyu dağılım parametrelerindeki değişimle, önemli ölçüde iyileşmektedir.

Aşındırıcı malzemelerin tane büyüklüğü su jeti kesme sisteminde aşındırıcının gücünü belirleyen önemli unsurlardan biridir. Tane büyüklüğü veya tane çapı kavramı genelde birçok şekilde ifade edilmektedir. Burada tanenin şekli tam küre olmadığından sözü edilen çap ifadesi de aslında eşdeğer kürenin çapı olmaktadır. Tane boyu ilgilenilen malzemenin boyutlarına göre eğer büyük boyuttaysa inch veya mm, küçük boyutta ise µm veya nanometre birimleriyle ifade edilmektedir.

Aşındırıcılı su jeti ile kesme işleminde, tane boyu, standard Tyler elek serilerine göre meş olarak verilmektedir. Tyler elek açıklıkları (meş) ile ortalama tane çapları arasında aşağıda verilen bir ilişki bulunmaktadır.

$$d_p = 17,479 \text{ meş}^{-1.03315} \quad (R^2=0.998) \quad (8.9)$$

ASJ ile kesme işlemlerinde 50#, 60#, 80# ve 100#'lik aşındırıcılar kullanılmakla birlikte dünyada ve ülkemizde büyük çoğunlukla 80#lik aşındırıcılar tercih edilmektedir.

İnce öğütülmüş malzemelerin tane boyutu dağılımını matematiksel olarak ifade etmek için birçok model geliştirilmiştir. Bu modeller ampirik ifadeler olup boyut dağılımını yansıtabilmeleri ile orantılı olarak geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu eşitliklerin tümü (Çizelge 2.12) aşağıdaki genel formun farklı biçimleridir.

$$M_0(d_p) = f\left(\frac{d_p}{d^*}\right) \quad (8.10)$$

Burada; d^* , boyut modülü olarak ifade edilir ve ortalama tane çapını göstermektedir. Eşitlik bir üst boyut limitine sahipse d^* , dağılımın maksimum tane büyüklüğünü verir. Yukarıdaki eşitlik ikinci bir parametre daha içerir, n , dağılım modülü olup tane boyu dağılımının yayılımını göstermektedir. “ n ” ne kadar büyürse tane boyu dağılımı o kadar homojen ve dar aralıkta olmaktadır.

Tane boyu dağılımının belirlenmesi kadar bu dağılımı özetleyecek bir ortalama tane çapının belirlenmesi de oldukça önemlidir. Elek analizinden bir örneğin tane boyut dağılımı biliniyorsa birkaç ortalama tane çapı değeri hesaplanabilir. Orta tane çapı (medyan) (d_{50}), kümülatif dağılım eğrisinde %50 noktasına gelen değerdir. Geometrik ortalama tane boyu ise dağılımdaki en büyük çap ile en küçük çap değerinin

ortalamasıdır. Bir diğer çap ise istatistiksel çap olarak tanımlanmaktadır ve aşağıdaki eşitlikle verilmektedir.

$$d_{PSt} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot d_{Pi})}{100} \quad (8.11)$$

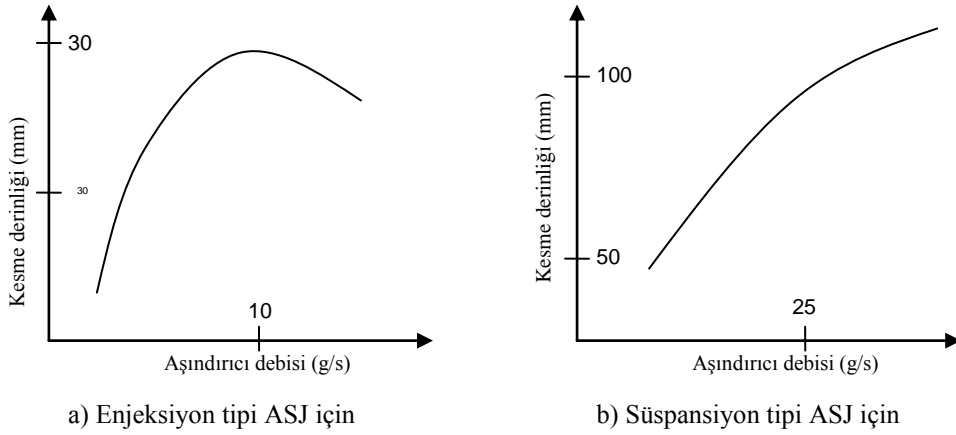
Çizelge 2.12 Tane boyut dağılım fonksiyonları

Adı	Formülü $M_0(d_p)$	d^* 'nin anlamı
Logaritmik olasılık	$\text{erf} \left[\frac{\ln \frac{d_p}{d^*}}{\sigma} \right]$	Ortalama tane çapı
Rosin-Rammler-Sperling (RRSB)	$1 - \exp \left[- \left(\frac{d_p}{d^*} \right)^n \right]$	$M_0 = \%63.2$ 'deki tane çapı
Gates-Gaudin-Schumann	$\left(\frac{d_p}{d^*} \right)^n$	
Gaudin-Meloy	$1 - \left[1 - \frac{d_p}{d^*} \right]^2$	Maksimum tane boyu
Broadbent-Callcott	$\frac{1 - \exp \left[- \frac{d_p}{d^*} \right]}{1 - \exp(-1)}$	

2.7.6 Aşındırıcı Malzemelerin Tane Sayısı ve Kinetik Enerjisi

Aşındırıcı debisi, taneciklerin kinetik enerjilerini olduğu kadar çarpma etkisi yaratan parçacık sayısını da belirler. Daha yüksek debiler, karışma ve kesme sürecinde daha fazla sayıda parçacık içerir. Nispeten küçük debiler için, debideki artış kesme derinliğinde kısmi bir artışa sebep olur. Daha yüksek debiler için, karışım odasında parçacık çarpışmaları ve benzeri bazı sönümlenme mekanizmaları gelişir. Ayrıca, su

jetinin kinetik enerjisi çok fazla parçacık üzerine dağıldığında tek bir tanenin kinetik enerjisinde azalma gerçekleşir. Kesme derinliği, optimum kütleli aşındırıcı debisinde maksimum olmaktadır.



Şekil 2.22 Aşındırıcı debisi-kesme derinliği ilişkisi

Bir aşındırıcı örneğinde bulunan aşındırıcı sayısı yaklaşık olarak:

$$N_p = \frac{m_A}{m_p} \cdot t \quad (8.12)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.

Küresel taneler için:

$$m_p = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_p \quad (8.13)$$

Eğer istatistiksel tane çapı eşitlikte kullanılırsa ilerleyen nozuldan çıkan aşındırıcı tane sayısı;

$$N_p = \frac{6.100^3 \cdot m_A \cdot x}{\pi \cdot \rho_p \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot d_{p_i})^3 \cdot v} \quad (8.14)$$

eşitliği yardımıyla belirlenebilir. Burada; v: nozul ilerleme hızıdır.

Eşitlikten de görülebileceği gibi, verilen bir ilerleme hızı için, aşındırıcı debisi arttıkça aşındırıcı sayısı da artmaktadır. Aşındırıcı yoğunluğu arttıkça aşındırıcı sayısı azalmaktadır. Aşındırıcı tane darbe sıklığı (frekansı);

$$f_p = \frac{N_p}{t} = \frac{m_A}{m_p} \quad (8.15)$$

Verilen bir uygulama süresi için aşındırıcı debisi arttıkça ve aşındırıcı tane çapı azaldıkça tane darbe frekansı artmaktadır. Aşındırıcı yoğunluğu arttıkça tane darbe frekansı azalmaktadır.

Küresel bir aşındırıcı tanenin kinetik enerjisi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$E_p = \frac{\pi}{12} \cdot d_p^3 \cdot \rho_A \cdot v_p^2 \quad (8.16)$$

Aşındırıcılı su jeti oluşumunda su jetinin sahip olduğu kinetik enerjinin tümü aşındırıcı taneye aktarılamaz. Enerjinin bir kısmı tanenin ivmelenmesinde harcanır. Sabit bir akış debisinde, nozul ilerleme hızında, nozul mesafesinde ve belirli bir aşındırıcı malzeme için karışımdan sonra aşındırıcının sahip olduğu kinetik enerji:

$$E_p = \alpha_T \cdot \frac{E_w}{N_p} \text{ eşitliğiyle verilmektedir.} \quad (8.17)$$

Aşındırıcı akış debisi arttıkça bu katsayı da artmaktadır. Bir aşındırıcı tanenin kinetik enerjisi aşındırıcı akış debisinin artmasıyla ve aşındırıcı tane çapının azalmasıyla birlikte azalmaktadır.

Aşındırıcı tanenin darbe enerjisiyle darbe frekansı arasındaki ilişki ise aşağıdaki eşitlikle verilmektedir.

$$E_p = C \cdot \frac{1}{f_p} \quad (8.18)$$

Burada; C su jetinin sahip olduğu enerji ve aşındırıcı tanenin geometrik ve mekanik özellikleriyle ilgili bir katsayıdır.

2.7.7 Aşındırıcı Malzeme İlave Metotları

Aşındırıcılı su jeti oluşturulurken aşındırıcı tanelerin bir şekilde su jeti içine ilave edilmesi ve böylece yüksek hızlı su jeti yardımıyla ivmelendirilerek gereken aşındırma-kesme gücüne sahip olması amaçlanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesinde iki temel yöntem izlenmektedir.

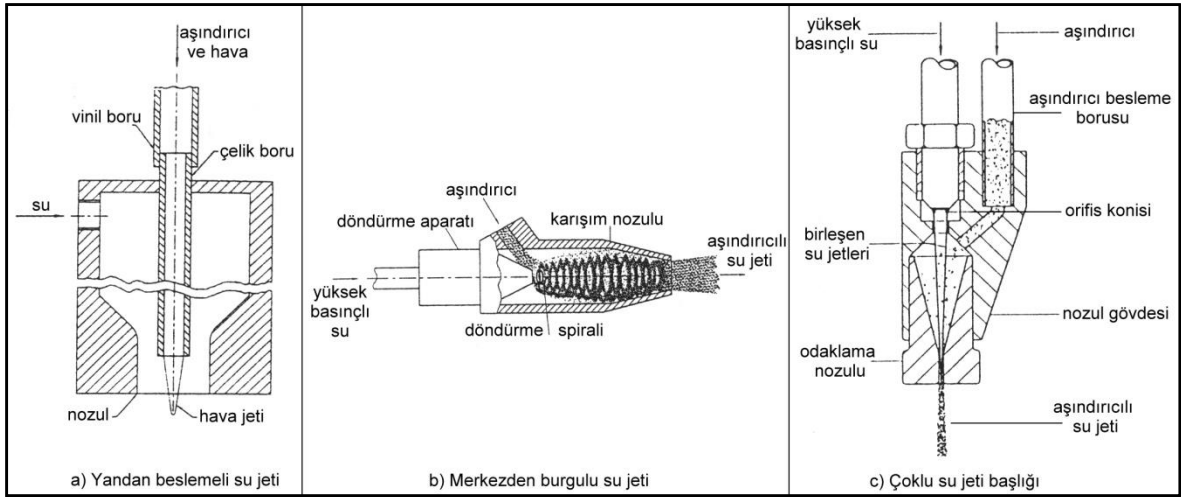
Birincisi; tez kapsamındaki benzer şekilde ‘enjeksiyon tipi’ adı verilen aşındırıcılı su jeti nozulları kullanılarak su jeti çıkışına aşındırıcı eklenmesi ve aşındırıcı+su karışımının bir tüpten geçirilerek odaklandırılması ve ivmelendirilmesiyle aşındırıcılı su jetinin elde edilmesidir. Bu nozullarda, su jeti karışım odasından (enjeksiyon odası) geçip odaklama tüpü içerisine girerken karışım odasında bir vakum etkisi oluşturur. Bu etkiyle karışım odasına bağlı aşındırıcı besleme hattından 0,3-3m³/h miktarında hava ile birlikte aşındırıcı taneler de alınır (doktora tezi). Taşınan hava ve aşındırıcı, karışım odasında su jetiyle birleşip ivmelendirilerek odaklama tüpünden geçer ve böylelikle aşındırıcılı su jeti oluşturulmuş olur.

Karışım odasının dizaynı, oluşan vakum etkisiyle karışım odasına giren aşındırıcı tanelerin jetle süratle birleşip odayı terketmesini sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Aksi takdirde, karışım odasında biriken aşındırıcı taneler odaklama tüpünün girişini tıkayıp su jetinin geri tepmesine neden olacaktır. Bu durumu engellemek için aşındırıcı besleme kanalından basınçlı hava verilmesi ise kesme işlemini olumsuz yönde etkileyecektir.

Bu tip nozullarda en iyi sonucu alabilmek için, orifis çapı, odaklama tüpü çapı, karışım odası geometrisi, odaklama tüpü boyu, orifis ile odaklama tüpü girişi arası mesafe, aşındırıcı girişi ile odaklama tüpü arası mesafe, orifis ile odaklama tüpünün

merkezlenmesi en iyi şekilde ayarlanmalıdır. Bu konudaki araştırmalar günümüzde de yoğun bir Şekilde devam etmektedir.

Daha farklı da enjeksiyon tipi ASJ nozulları aşındırıcı karışımını sağlamak için kullanılmaktadır. Şekil 2.23’de bu nozullardan bazı örnekler görülmektedir.

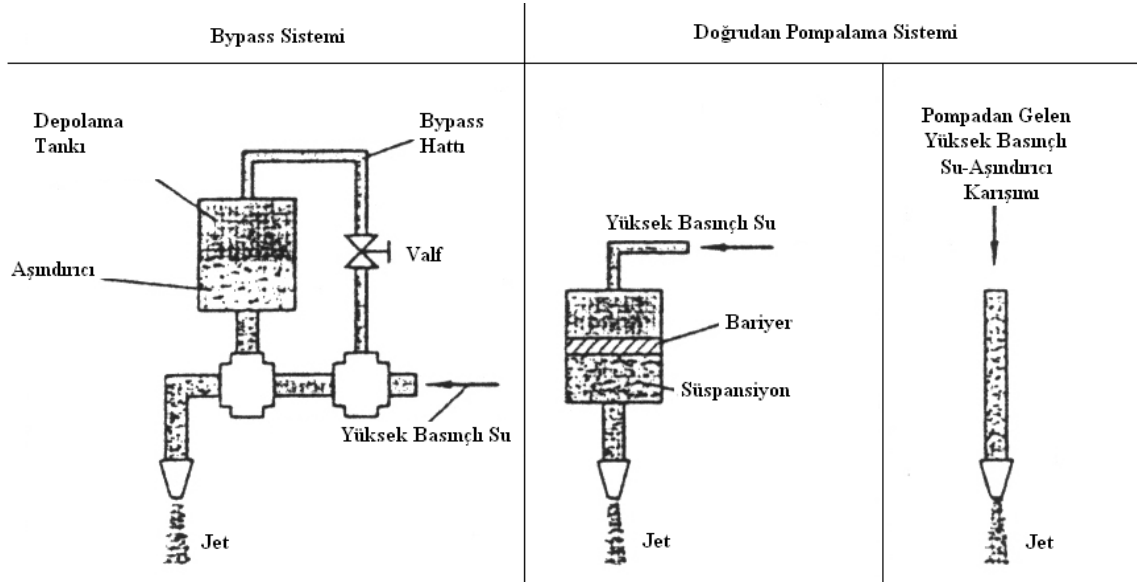


Şekil 2.23 Alternatif enjeksiyon tipi ASJ nozulları

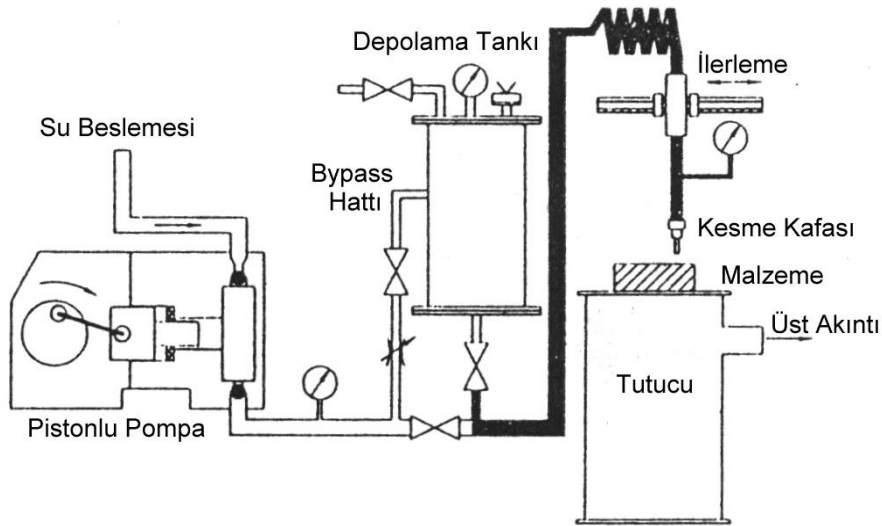
Yukarıdaki Őekillerden Şekil 2.23.a’da verilen nozulda basınçlı su yandan beslendiği için burgulu bir akış oluşacaktır. Burada aşındırıcı havayla yukarıdan beslendiği için oluşacak su jeti içinde merkezde yoğun bir dağılım gösterecektir. Fakat oluşacak su jetinin hızı düşük olacaktır. Şekil 2.23.b’de ise su jeti bir girdap hareketi oluşturarak ilerlemektedir. Girdap hareketiyle aşındırıcı emilimi ve jet içerisine karışımı daha verimli olmakla birlikte, büyük orifis (3mm) ve odaklama tüpü (7mm) apı gerektirdiğinden pompa basıncı 10 MPa ile sınırlıdır. Şekil 2.23.c’deki nozulda birkaç su jeti demeti bir noktada birleştirilerek aralarına aşındırıcı taneleri almaları sağlanmaktadır. Bu tip nozullar 100MPa seviyesinde orta derecede pompa basınçlarında kullanılmaktadırlar.

İkinci yöntemde ise; aşındırıcı ve su sistemde önceden karıştırılıp bir süspansiyon haline getirilmekte ve daha sonra bu karışım nozula gönderilerek aşındırıcı su jeti oluşturulmaktadır (Şekil 2.24).

Süspansiyon sisteminde aşındırıcı+su karışımı ya doğrudan pompalanarak nozula iletilir (doğrudan pompalama sistemi) veya basınçlı su pompayla üretilerek bu basınç, aşındırıcı+su karışımına aktarılır ve sonuçta oluşan yüksek basınçlı aşındırıcı+su karışımı nozula iletilir (bypass sistemi). İki sistemin yapıları farklı olduğu gibi elde edilen basınçlar da farklıdır. Doğrudan pompalama sisteminde basınç 200 MPa'a kadar çıkabilirken, bypass sistemi 350 Mpa basınç değerine ulaşabilir.

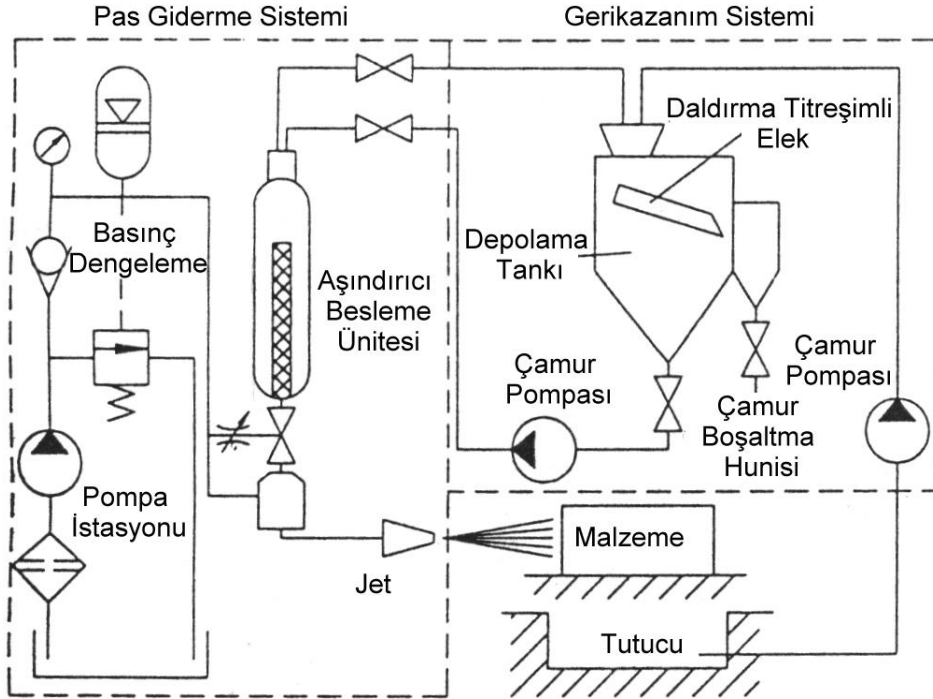


Şekil 2.24 Süspansiyon su jetlerinde aşındırıcı besleme yöntemleri



Şekil 2.25 Bypass prensibiyle çalışan DIAJET sistemi

Bypass sisteminde, basınçlı suyun bir kısmı aşındırıcı malzemenin bulunduğu ortamdan taşınarak ana iletim hattına karıştırılmasında kullanılır. Şekil 2.25’de önceki bypass sistemlerinin (DIAJET) genel yapısı görülmektedir. Sistem, pistonlu pompa, yüksek basınca dayanıklı aşındırıcı depolama tankı, bypass hattı ve aşındırıcı nozulundan oluşmaktadır. Pompadan gelen basınçlı su üç kısma ayrılır. Bunlardan debi olarak büyük orana sahip olan ilk kısmı aşındırıcı süspansiyon tankına gider. İkinci kısmı ise tanktan gelen süspansiyonu arkadan itmek için kullanılır. Üçüncü kısmı ise tankın en üstüne uygulanarak geniş aşındırıcı kolonuna basınç uygulanması sağlanır. Birçok araştırmacı bu sistemi geliştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Burada incelenen temel problem aşındırıcının nakli ve akış miktarının kalibrasyon ve kontrolüdür. DIAJET sisteminin bir gelişmiş modeli PREMAJET de Şekil 2.26’da verilmiştir.

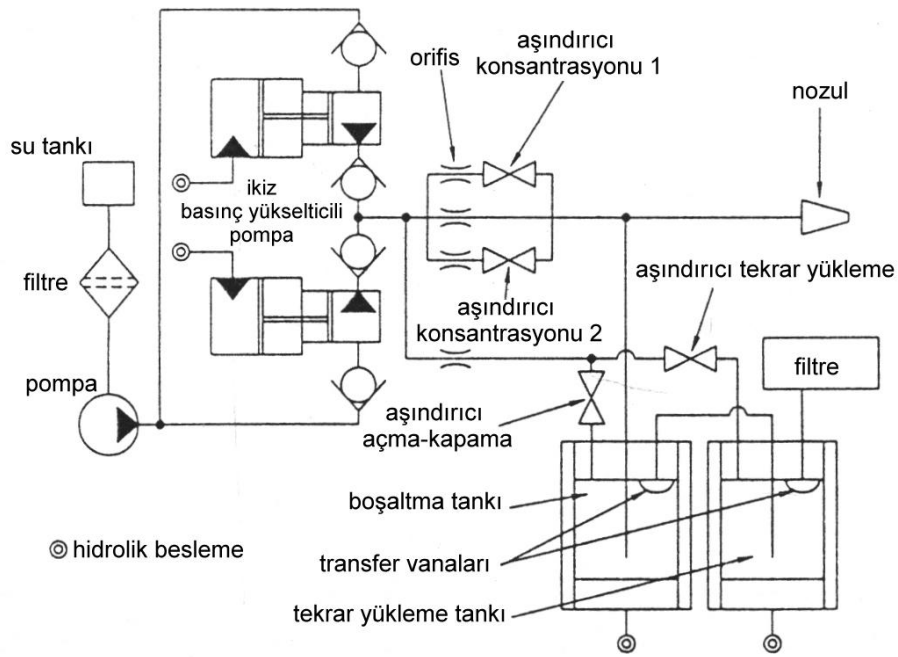


Şekil 2.26 Bypass prensibiyle çalışan PREMAJET sistemi

Direk pompalama sistemiyle çalışan bir süspansiyon aşındırıcılı su jeti sisteminin temel yapısı Şekil 2.27’de verilmiştir. Bu sistemde, önceden karıştırılmış süspansiyon şeklindeki aşındırıcı+su karışımı, yüksek basınçlı suyun içine pompalanmasıyla basıncı yükselttilen bir basınç tankına beslenir. Verilen bu su ile süspansiyonun birbirine karışmaması için araya bir bariyer koyulmaktadır. Tank içerisindeki aşındırıcıların su

içerisinde asılı kalmalarını sağlamak ve çökelmelerini önlemek amacıyla bu sistemlerde genellikle yüksek viskoziteye sahip katkılar kullanılmaktadır.

Hashish (1991) yapmış olduğu kesme çalışmalarında bu katkı maddelerini kütlece %3 oranında kullanmış ve olumlu sonuçlar aldığını belirtmiştir. Hollinger vd. (1991) yapmış oldukları bir çalışmada çeşitli katkı maddelerini karşılaştırmışlardır. Metil-selüloz çözeltisi ve polimerik “süper su” çözeltilerini kütlece %1.3-3.9 oranında karıştırmışlar ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.



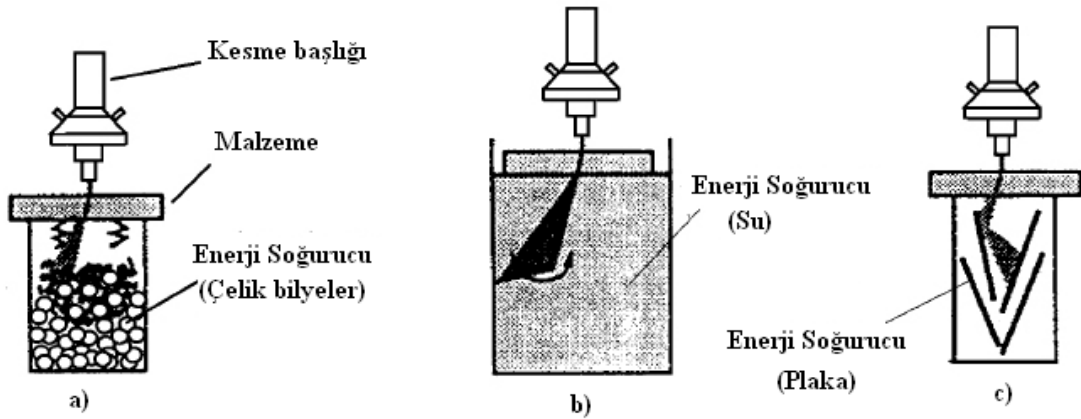
Şekil 2.27 Direk pompalama prensibiyle çalışan su jeti sistemi

2.7.8 Toplayıcılar

Toplayıcılar (tutucular) aşındırıcılı su jetinin işlem gören parçayı kestikten sonraki kısmının makina parçalarına zarar vermesini önlemek ve gürültü vb. Çevresel etkilerini azaltmak için kullanılan aletlerdir. Jetin nozul çıkışından sonraki gücünün yaklaşık %75'i kesilecek malzemeyi terk ettikten sonra da jet içerisinde kaldığından (Kalpakçıyan, 1995), önlem alınmadığı takdirde malzeme altındaki tezgah vb. delinip zarar görebilir. Ayrıca jetin malzeme dışına çıktığı durumlarda sahip olduğu tüm güç

tezgaha iletilecektir. Jetin tezgaha doğrudan etki etmeden belli bir sistemle yakalanıp enerjisinin soğrulması için kullanılan sistemlere tutucular veya toplayıcılar adı verilir. Bu sistemler, jetin makina parçalarına zarar vermesini önlemenin yanında gürültü, toz vb. zararlı çevresel etkilerini de azaltırlar. Tutucular jetin enerjisini kontrol edebilmek için sağlam, emniyetli ve uzun ömürlü olmalıdır.

Çalışılan malzemenin geometrisi, makina yapısı, çevresel gereksinimler ve kullanılan jetin türüne göre tutucu sistemin yapısı değişmektedir. Kullanılan tutucu sistemleri; taşınabilir tutucular, tank tutucular ve kanal tutucular olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 Değişik yapıdaki jet tutucular (a:taşınabilir tutucu, b:tank tutucu, c:kanal tutucu)

Taşınabilir tutucular, tüp veya benzeri bir kap ve içindeki çelik bilye vb. enerji soğuran malzemelerden oluşur. Bu malzemeler kullanıldıkça aşınır ve belli aralıklarla kabın içerisindeki malzeme yenilenir. Taşınabilir tutucular, altı eksenli çalışan robotlara monte edilebilen oldukça sağlam yapıları sistemlerdir.

Tank tutucular, kesilecek malzemenin bir tezgah üzerinde sabit durduğu ve kesme kafasının (nozulu) sadece iki eksenli hareket ettiği şartlarda kullanılmaktadır.

Tank tutucular kesim alanını oluşturan tezgahın altında yer alırlar ve tabanını tamamen kaplarlar ve enerjiyi soğurmak için içleri su ile doludur. Malzemenin üzerine koyulduğu tezgah ise düşey yönde yan yana dizilmiş plakalardan oluşur. Böylece jetin etkisi altındaki tankta bulunan suya iletilir. Tankın derinliği 60cm'den az olmamalıdır. Bu derinliğin daha az olması jetin enerjisinin tam olarak soğulamamasına yol açacağından tank tabanında aşınma ve delinmelere yol açacaktır. Uygulamalarda 40cm derinlikte jetin tank tabanında delinmelere yol açtığı tespit edilmiştir.

Kanal tutucular, kesilecek malzeme ile nozulun ters doğrultuda hareket ettiği durumlarda kullanılırlar. Jet bu sistemde özel olarak yerleştirilmiş kanatlara çarptırılarak enerjisi tüketilir. Diğer tutuculara oranla ağırlığı azdır ve hareket ettirmeye daha uygundur.

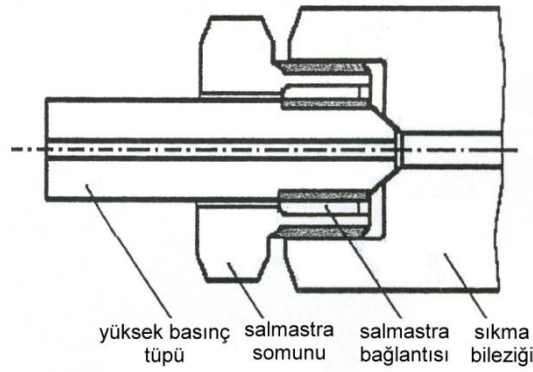
2.7.9 Basınç İletim Ekipmanları

Yüksek basınçlardaki suyu elde etmek kadar bu basıncı muhafaza etmek ve kesme başlığına yani nozula iletmek de özel bir öneme sahiptir. Bu işi yapabilmek ancak yüksek basınca dayanıklı özel yapılmış boru hattı, bağlayıcılar ve contalar kullanmakla mümkündür. Yüksek basınç sistemlerinde pompadan kesme merkezine basınçlı suyun iletiminde AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çelikten sert boru hattı kullanılmaktadır. Boru çapı kullanılan sistemdeki debi ihtiyacına göre değişim göstermektedir (Çizelge 2.13)

Çizelge 2.13 Su jeti kesme sistemlerinde kullanılan basınçlı su iletim boru boyutları

Boyut	Dış Çap	İç Çap
1	6,3 mm (1/4 inç)	1,6 mm (1/16 inç)
2	9,5 mm (3/8 inç)	3,2 mm (1/8 inç)
3	14,3 mm (9/16 inç)	4,8 mm (3/16 inç)

Ana iletim daha büyük çaplı borularla yapılırken, kesme kısmına yakın kısa bağlantılar küçük çaplı borularla gerçekleştirilir. Esnek ve hareketli bağlantılar için döner bağlantılar veya hortumlar kullanılır. Boru bağlantıları ise Şekil 2.29'da görüldüğü gibi erkek ve dişi konik bağlantı elemanları ile yapılmaktadır. Erkek borunun ucu 58-590 açıyla konikleştirilirken buna uygun dişi koni 600 açıyla hazırlanmaktadır. Bunlar sıkma bileziği ve salmastra yardımıyla sıkıldıklarında konik ucun çok küçük temas alanında elde edilen çok yüksek gerilmeler sayesinde boru içerisindeki yüksek basınç tutularak sızdırmazlık sağlanır.



Şekil 2.29 Bağlatı elemanlarında sızdırmazlık sağlanması

Bu sisteme alternatif, yüksek basınca dayanıklı hortumların kullanılmasıdır. Ancak ömürlerini, çalışma sırasındaki durumlarını tespit etmek güç olduğundan güvenlik gerekçesiyle pek kullanılmamaktadır.

Boru hattının uzunluğu sistemde basınç düşüşlerine neden olabilmektedir. Basınç düşüşünün temel nedenleri; boru hattı boyunca oluşan sürtünme kaybı ile valf ve bağlantı noktalarında oluşan kayıplardır.

Bir boru hattı boyunca meydana gelen basınç kayıpları aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (8.19)$$

Eşitlikte; ρ , akışkanın özgül ağırlığı, v akışkanın hızı, λ boru duvarlarının pürüzlülüğüne ve Reynold sayısına bağlı basınç düşme sabitidir. Reynold sayısının 10^5 'den küçük olduğu durumlarda;

$$\lambda = \frac{0,32}{(\text{Re})^{0,25}} \text{ kabul edilebilir.} \quad (8.20)$$

Bağlantı elemanlarındaki basınç kayıplarını hesaplamak oldukça güçtür. Deneysel yöntemlerle belirlenen kayıplar sürtünme faktörü (ξ) olarak imalat etiketlerinde yazılır. Basınç kayıpları sürtünme faktörü kullanılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (8.21)$$

2.7.10 Kontrol Ünitesi

Su jeti ile kesme uygulamaları ilk başlarda kazı-koparma-ayırma gibi işlemlerde kullanılmaktayken, sistemin bilgisayar kontrolüne girmesiyle ve kontrol yazılımlarındaki gelişmelerle birlikte hassas kesim yapan bir uygulama haline gelmiştir.

SJ veya ASJ ile kesme uygulamalarında kullanılan sistemler 2 veya 3 boyutlu kesme sistemleridir. Tez kapsamında da kullanılan sistem plaka türü (2 boyutu kalınlığına göre fazla olan) malzemelerin kesilmesinde kullanılan 2 boyutlu kesme sistemidir. Burada bilgisayar kontrollü iki eksen yani x-y tablası ve malzeme kalınlığını işlemek için manüel veya yine bilgisayar kontrollü bir z eksenine mevcuttur.

3 boyutlu sistemler ise daha karmaşık olup 5 veya 6 hareket sistemine ihtiyaç duyarlar. Böyle bir kontrol sistemi 0.1-400 mm/sn aralığında yanal hızları 3 boyutlu uzayda en az 5 koordinat ekseninde üretebilmektedir.

ASJ kesme sisteminde, herhangi bir bilgisayar destekli tasarım (CAD) programıyla üretilen tasarım verileri, CADAM veya CATIA bilgisayar destekli tasarım programları

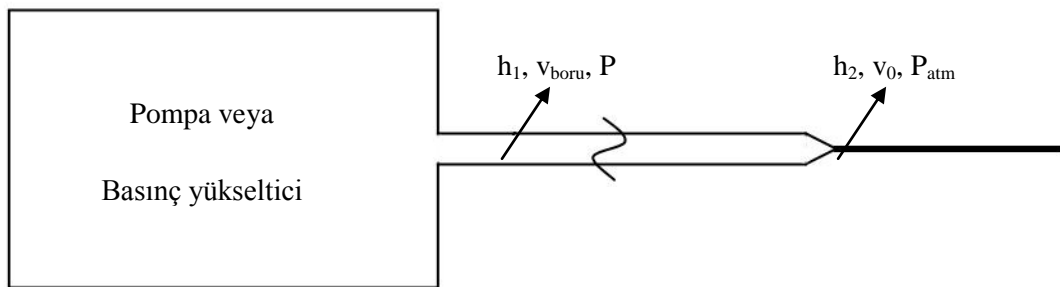
kullanılarak değerlendirilmekte ve DNC (doğrudan sayısal denetim) cihazına ve sonra da hücre denetçisine girilmektedir.

Üretici firmaların sunduğu bilgisayar yazılımları, kesme hızı ve maliyetini 20'ye yakın parametrenin fonksiyonu olarak verebilmektedir. Böylece, belirli bir malzeme ve kalınlık için çeşitli parametrelerin kesme işlemini nasıl etkilediği görülebilmektedir. Yazılımlardaki gelişmelerle birlikte optimum parametrelerin seçimi ve kontrolü daha kolay hale gelmiştir.

2.8 Su Jetinin Elde Edilmesi, Yapısı ve Özellikleri

Daha önce de belirtildiği gibi su jeti terimi çok yüksek hızlardaki su demetini ifade etmektedir. Tüp içerisindeki hızı saniyede birkaç metre olan 400 Mpa civarında yüksek basınca sahip suyun orifis adı verilen dar bir aralıktan ivmelenerek çıkmaya zorlanması neticesinde su jeti oluşur. Su orifisten geçerken sahip olduğu yüksek basınç orifis çıkışında atmosfer basıncına düşmektedir. Bu sırada suyun hidrostatik enerjisi de enerjinin korunumundan hareketle kinetik enerjiye dönüşmektedir. Bu durumda Bernoulli eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_{\text{atm}} + \frac{\rho_{\text{su}}}{2} \cdot v_o^2 + \rho_{\text{su}} \cdot g \cdot h_1 = P + \frac{\rho_{\text{su}}}{2} \cdot v_{\text{boru}}^2 + \rho_{\text{su}} \cdot g \cdot h_2 \quad (9.1)$$



Şekil 2.30 Su jetinin oluşumu

Suyun orifisten çıktığı nokta dikkate alındığında (Şekil 2.30)

$h_1=h_2$, $P_{atm} \ll P$ ve $v_o \gg v_{boru}$ olduğundan orifis çıkışında suyun hızı;

$$v_o \text{ (teorik)} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{su}}} \text{ eşitliğiyle hesaplanabilir.} \quad (9.2)$$

Gerçekte sürtünmelerden, suyun sıkışabilirliğinden ve türbülansından dolayı oluşan kayıplar jet hızının bu değerden daha düşük olmasına neden olur. Gerçekte oluşan jetin hızı;

$$v_o = \lambda \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho_{su}}} \text{ eşitliğinden bulunur.} \quad (9.3)$$

Burada; λ , çeşitli kayıpları karakterize eden verim katsayısıdır. Bu katsayı formüllerden görüleceği gibi su jetinin teorik hızının gerçek hızına oranıdır. Jetin gerçek hızını ölçmek için araştırmacılar çeşitli yöntemler kullanmışlardır. Aşındırıcılı su jetinde, aşındırıcı taneler içinde buldukları su ile aynı hıza sahip olduklarından araştırmacılar bu tanelerin hızını ölçme yoluna gitmişlerdir. Swanson vd. (1987) manyetik aşındırıcı taneler kullanarak jet çıkışına iki iletken tel halka koyup tanelerin bunların arasından geçerken tel üzerinde oluşturdukları elektriksel sinyalleri izlemişler ve iki halka arasını ne kadar sürede geçtiklerini tespit ederek tanelerin ve dolayısıyla jetin hızını belirlemişlerdir. Bazı araştırmacılar ise lazer ışını kullanarak tanelerin ve jetin hızını tespit etmeye çalışmışlardır. Momber vd. (1995) ise jetin bir dinamometre üzerine çarpmasını sağlayarak darbe kuvvetini ölçmüşler ve momentum korunumundan hareketle aşağıdaki hız eşitliğini geliştirmişlerdir.

$$V_{jet} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{jet}}{\pi \cdot \rho_{jet} \cdot d_{jet}^2}} \quad (9.4)$$

Eşitlikte; f_{jet} , jetin darbe kuvveti, ρ_{jet} , su jeti yoğunluğu, d_{jet} , su jeti çapıdır. Bu formüldeki v_{jet} , jetin gerçek hızı olarak kabul edilirse jet oluşumdaki kayıpları ifade eden λ katsayısı da aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir:

$$\lambda = \frac{v_o}{v_{o(\text{teorik})}} = \frac{v_{\text{jet}}}{v_{o(\text{teorik})}} = \sqrt{\frac{2.F_{\text{jet}}}{\pi \cdot \rho \cdot d_{\text{jet}}^2}} \quad (9.5)$$

2.8.1 Su Jetinin Kinetik Enerjisi

Su jeti orifisi terk ettiği anda sahip olduğu kinetik enerji;

$$E_k = \frac{1}{2} m_{\text{su}} \cdot v_o^2 \cdot t \text{ eşitliğiyle hesaplanabilir.} \quad (9.6)$$

Buradaki m_{su} su debisidir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$m_{\text{su}} = \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \cdot v_o \cdot \rho_{\text{su}} \quad (9.7)$$

Eşitlikte d_o orifis çapını ifade etmektedir. Bu iki eşitliğin birleştirilmesi sonucunda;

$$E_k = \alpha \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_o^2 \cdot \mu^3 \cdot \left[\frac{2.P}{\rho_{\text{su}}} \right]^3 \cdot \rho_{\text{su}} \cdot t = \frac{\alpha \cdot \pi \cdot \mu^3}{\sqrt{2\rho_{\text{su}}}} \cdot d_o^2 \cdot P^{1.5} \cdot t \text{ eşitliği elde edilir.} \quad (9.8)$$

Eşitlikteki α sayısı orifis duvarındaki sürtünmelerden kaynaklanan akış düşmesine bağlı boyutsuz katsayıdır. Deneysel çalışmalar sonucunda belirlenebilecek α katsayısı safir orifisler için 0.6-0.8 arasında değer almaktadır.

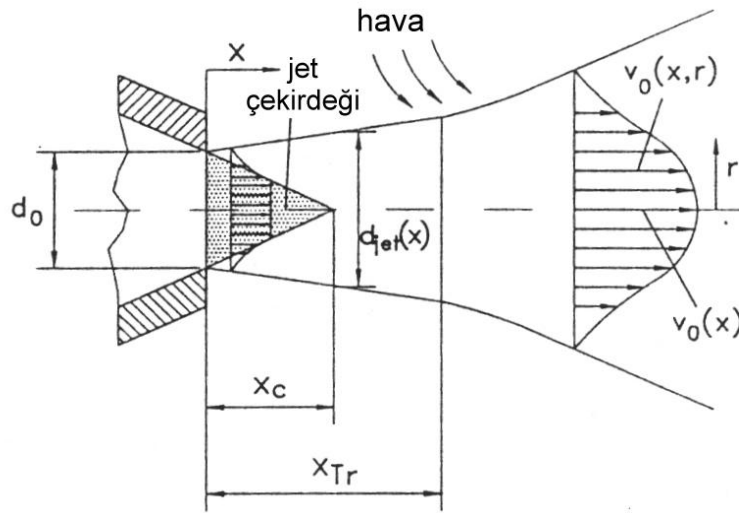
Momber (1998) yaptığı çalışmada aşındırıcılı su jetini bir dinamometre üzerine tatbik etmiş ve darbe kuvvetinden yola çıkarak sahip olduğu kinetik enerjiyi belirlemiştir. Daha sonra ise malzeme kesimi sırasında malzemeyi kesip geçen aşındırıcılı su jeti altına dinamometre koyarak oluşan ASJ+kırıntı malzeme karışımının sahip olduğu kinetik enerjiyi hesaplamıştır. Çalışma sonucunda malzeme uzaklaştırılmasında kullanılan kinetik enerjinin jetin başlangıçtaki kinetik enerjisinin %3'ü kadar olduğu tespit edilmiştir.

2.8.2 Saf Su Jetinin Yapısı

Su jeti orifisi terk ettikten sonra basıncın yeterli olduğu mesafeye kadar yüksek hızla doğrusal olarak ilerler. Jetin çapı orifisten çıkmasıyla birlikte giderek artmakta ve kesme etkisi bununla ters orantılı olarak azalmaktadır. Jetin basınç veya hız profillerine bakıldığında jet merkezinden kenarlara doğru basınçta ve hızda bir düşüş olduğu görülmektedir. Bunun sebebi jetin havayla temas eden dış kabuğunun sürtünme etkisiyle yavaşlaması ve bunun alt katmanları da etkileyerek yavaşlamalarına sebep olmasıdır.

Şekil 2.31’de görüldüğü gibi, jet nozulu terk ettiğindeki kabaca çan şeklindeki yapısı üç temel bölümden oluşmaktadır. Bunlar; çekirdek kısmı, geçiş bölgesi ve son kısımdır. Çekirdek kısmındaki duyarlı basınç her noktada aynıdır, bu bölgenin uzunluğu orifisin çapıyla ilişkilidir.

A ile gösterilen x_c/d_0 oranı jet akışının Reynold sayısına ve orifis geometrisi ve kalitesine bağlıdır. Bu konuda yapılan çalışmalar A’nın 50 ile 125 arasında değer aldığını göstermektedir (Momber, 1997). A’nın değeri pompa basıncı ve dolayısıyla jet hızıyla da ilgilidir.



Şekil 2.31 Yüksek hızlı su jetlerinin yapısı

Geçiş zonunun uzunluğu da yine orifisle ilişkilidir. B ile gösterilen x_t/d_0 oranı ise 90 ile 600 arasında değer almaktadır. Ayrıca $x_t \cong 5.33.x_c$ olarak alınabilir (Yanaida, 1974).

2.8.3 Aşındırıcılı Su Jetinin Yapısı

Sert veya sünek malzemeleri kesebilmek için işleme, aşındırıcı eklenmesi bir zorunluluktur. Aşındırıcı yüklü su jetlerinin geliştirilmesi, su jeti teknolojisinde bir yenilik olarak kabul edilmektedir. Bu jetlerin geliştirilmesiyle, bir çok yeni malzeme kesilebilir hâle gelmiştir.

Orifisten çıkan su jetinin aşındırıcı ASJ nozullarında bulunan karışım odasında aşındırıcı tanelerle karıştırılıp bir odaklama tüpünden geçirilmesiyle aşındırıcılı su jetleri oluşturulmaktadır. ASJ nozullarında fazladan bir karışım odası ve odaklama tüpü bulunduğundan oluşan aşındırıcılı su jetlerinin yapısını etkileyen daha fazla parametre mevcuttur.

Yüksek hızda aşındırıcı sulu jet ile kesme işlemi, birçok malzemeyi mekanik özelliklerine zarar vermeden kesme işlemine uyum sağladığı için , birçok endüstriyel uygulamada tercih edilmektedir. Plastik, mermer, deri gibi malzemelerin kesiminde kullanılan yöntem, alade kesme yöntemlerine göre, sert malzemelerin kesilmesinde çok daha ekonomiktir.

İki tip aşındırıcı sulu jet sistemi vardır. Birincisi, aşındırıcı malzemenin , yüksek basınçlı bir tank içerisinde su ile karışmasından oluşur ve "Aşındırıcı Çözelti Jet," "Abrasive Slurry Jet (ASJ)" diye adlandırılır. Elde edilen karışım , uzun ve yüksek basınçlı bir borudan ivmelendirilerek geçirilir ve çalışılan yüzeye direk pompalanır. Böyle bir sistem, aşındırıcı parçacıkların ve suyun bulunduğu , iki fazdan oluşan bir karışımdan meydana gelmektedir.

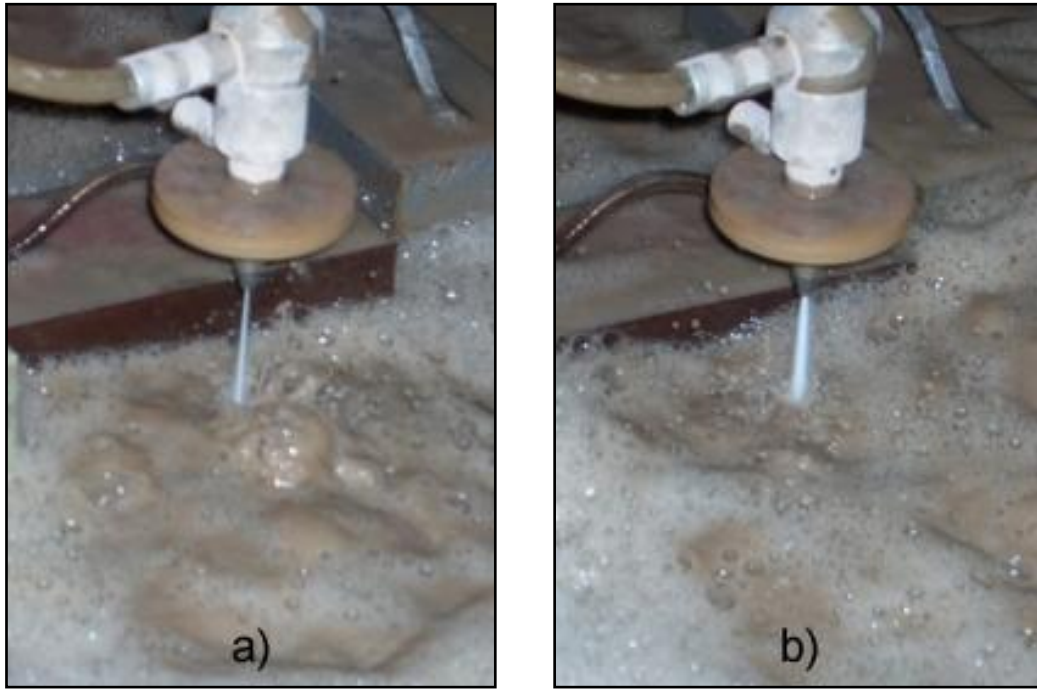
İkincisi, sisteme aşındırıcı malzemenin beslenmesinde kullanılır, "Aşındırıcı Sulu Jet," "Abrasive Water Jet (AWJ)" veya "PASER" diye adlandırılır. AWJ sisteminde, aşındırıcı malzeme, huni şeklindeki malzeme havuzundan geçerek, ventury yardımı ile

jetin içinden de geçirilir ve hareketli karışım bölümüne aktarılır. Karışım aşındırıcı malzeme, su ve havadan oluşmaktadır. Tanecik çalışılan yüzeye varmadan önce, akışkan jetin içinde ivmelenir ve kısa bir karbit karışımdan geçirilir.

ASJ nozullarından çıkan jetin yapısı, pompa basıncı, nozul çapı ve kalitesi, aşındırıcı tane özellikleri, aşındırıcı besleme miktarı vb. birçok parametreden etkilenmektedir.

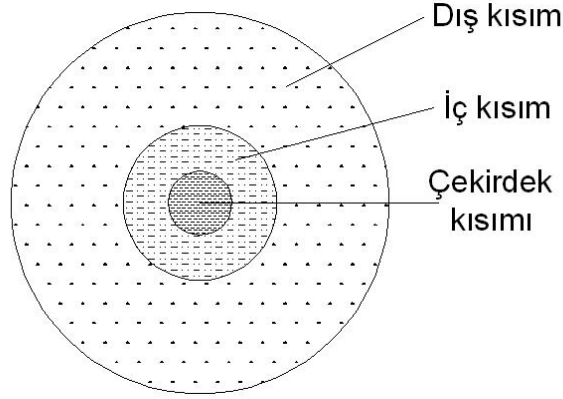
ASJ nozullarında karışım odasının yapısı nedeniyle bir vakum oluşmakta ve böylece sisteme aşındırıcı eklenmesi sağlanmaktadır. Bu vakumla jete aşındırıcı taneler eklenirken aynı zamanda hava da jetin bünyesine girmektedir. Yapılan araştırmalar oluşan jet içerisinde hacimsel olarak %1 aşındırıcı, %4 su ve %95 hava olduğu tespit edilmiştir (Tazibt 1996).

Jet ASJ nozulunu terkettikten sonra saf su jetine oranla hızlı bir şekilde çapı artarak ilerler (Resim 2.4). Çok az aşındırıcı ilavesi olduğu durumda nispeten jetin çekirdek yapısı gözlenmekle birlikte, aşındırıcı beslemesi arttıkça jetin çapsal olarak merkezden sapması hızla artmaktadır. Ayrıca aşındırıcı tane çapı arttıkça yine jetteki sapma miktarı artmaktadır.



Resim 2.4 Su jeti (a) ve aşındırıcılı su jetinin (b) nozuldan çıktıktan sonraki yayılımı

Simpson (1990) yaptığı çalışmada aşındırıcılı su jetinin yapısını incelemiş ve jetin üç ana kısımdan oluştuğunu belirlemiştir. Jetin kesiti düşünüldüğünde ASJ en içeride su jeti orifis çapı kadar olan çekirdek kısmı, bunun dışında odaklama tüpü iç çapı ile orifis çapı arasında kalan iç kısım ve ASJ nozulu iç çapı ile jetin en dışına çıkan aşındırıcı tanelerin oluşturduğu dış kısımdan oluşmaktadır (Şekil 2.32).



Şekil 2.32 Aşındırıcılı su jetinin doğrultu eksenine dik kesiti

Çalışmada tane boyu arttıkça aşındırıcı tanelerin jetin iç bölgesine girmekte zorlandığı ve çoğunlukla dış bölgeye doğru kaçtığı gözlenmiştir. Ayrıca, nozul çıkışından itibaren jet içerisindeki aşındırıcı tanelerin özellikle 12mm'den sonra jetin dışına doğru hızla çıktıkları gözlenmiştir.

ASJ ile kesme hataları genellikle jetin nozuldan çıktıktan sonra dağılarak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu hataları önlemek için uygulanan yöntemlerden biri, kullanılan suya süper su (super water) adı verilen katkı maddeleri eklemektir. Bu maddeler polietilen türü polimerlerden olup suyun hidrojen molekülleri arasındaki hidrojen bağınu güçlendirerek oluşan aşındırıcılı su jeti hüzmelerinin dağılmadan uzun mesafe almasını sağlamaktadırlar. (Geren, 2001; İnt. Kyn. 3).

Aşındırıcılı su jeti sistemine çok az miktarlarda eklenen bu maddelerle daha viskoz ve yağlayıcı özelliğe sahip su oluşturulduğu için, kesme verimi artırıldığı gibi sistemde oluşan aşınmalar da minimuma indirilmiş olmaktadır. Yapılan araştırmalarda sisteme süper su eklenmesiyle, pompa gücü gereksiniminin %31, aşındırıcı ihtiyacının %25-30

ve genel bakım giderlerinin %38 azaldığı ayrıca daha dar kesme aralığı olduğu, kesim işleminin daha hızlı ve kesim yüzeylerinin daha kaliteli olduğu görülmüştür.

Su jetinin kesme performansını artırmanın ve daha düzgün kenar ve köşeler oluşturmanın diğer bir yolu da nozulu açılı – salınlı kullanma, tek sefer yerine iki veya daha fazla seferde kesimin bitirilmesi gibi değişik kesme yöntemlerinin kullanılmasıdır. Bu yöntemlerle ilgili çalışmalar olumlu sonuçlar vermektedir (Chen, 2002;Wang, 2003).

2.8.4 Aşındırıcılı su jetleriyle kesme işlemi

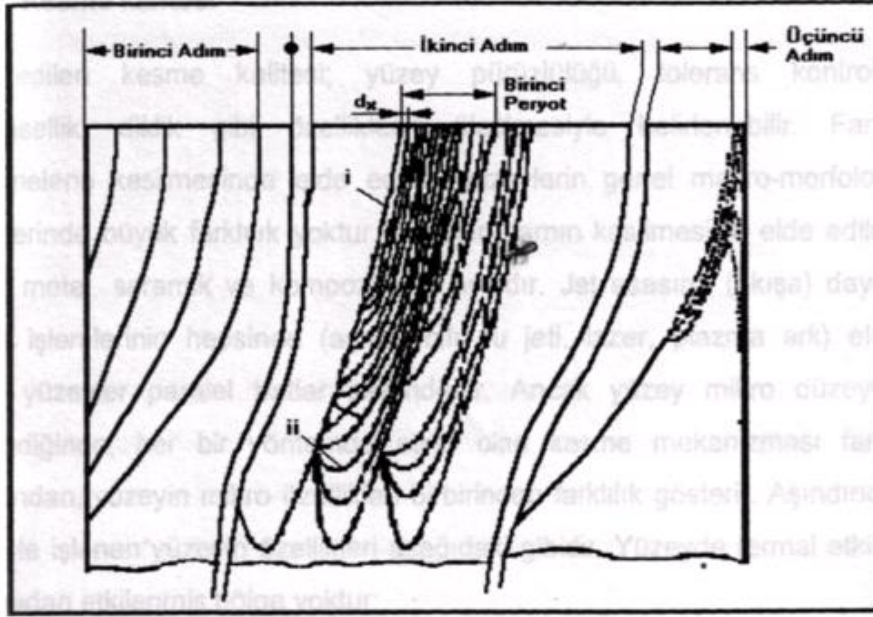
Bu kesme sisteminin kullanılması, hidrolik basınç, aşındırıcıların debisi, hortum çapı, aşındırıcıların hızı, aşındırıcı taneciklerin hızı gibi çalışma parametrelerinin ve özellikle, transvers hızı ve kesim derinliği gibi pratik parametrelerinde kontrolünde ve optimizasyonunda ortaya çıkabilecek problemlerin ortadan kaldırılmasını sağlar.

Kesme mekanizmasının karışık olmasından dolayı ve sisteme çok sayıda faktörün etkili olmasından dolayı, teorik modelleme yapabilmek oldukça zordur. Gerçekten, bu zorluk, sistemi ivmelenme ve kesme yönü ile iki ayrı kısımda inceleyip, elde edilen sonuçların birleştirilmesi ile ortadan kaldırılmıştır. Taneciklerin çarpışma anındaki hızlarını doğru saptayabilmek için, bu iki işlem birleştirilmelidir.

Aşındırıcı jetin kesme performansı; geometrik, hidrolik, aşındırıcı ve kesilen malzemelerin parametrelerinin etkili olduğu, kompleks bir optimizasyona bağlıdır. Bu parametrelerden kesme derinliği, jetin oluşturduğu erozyon, kesilme bölgesinde oluşan kısmi gerilimlerdeki ani değişimin neden olduğu malzeme deformasyonları ile kesilen malzemelerin özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkan mikro kesilme etkilerine bağlıdır (Hashish 1984, 1991)

Bir çok araştırmacı, aşındırıcılı su jetiyle kesme işleminde meydana gelen kesme mekanizmalarının periyodik olarak tekrar ettiği görüşünde birleşmektedirler. Sistemi tanımlayan ve yaygın olarak kabul edilen tanımlama "Hashish" tarafından, deneysel olarak jet yardımıyla pleksiglas kesildikten sonra yapılmıştır.

Yapılan deneyde, kesme işlemi yüksek hızlı film kamerasıyla kaydedilerek kesme işleminde meydana gelen safhalar görsel Barak izlenebilir hâle gelmiştir (Hashish 1984). Jet nüfuziyetinin bir çevrimi, jetin kesme hattı üzerinde yaklaşık olarak jet çapı kadar işlenmesiyle tamamlanır. Jetle kesme başlangıcında, jetin iş parçası kenarına ilk temasıyla parçada erozyon ve kanal oluşumu başlar. Şekil 2.33'de kesme işlemine ait bir iş çevrimi verilmiştir. İşlem; farklı alanlarda elde edilen kesme düzeyini göstermektedir.



Şekil 2.33 Aşındırıcılı su jeti ile kesmede, işlem aşamaları (Hashish 1984, 1991)

Kesme işlemi: A- Kesme işleminin başlangıcı (birinci adım), B- Düzenli nüfuziyet (ikinci adım) C- Jetin iş parçasını terk ettiği faz (üçüncü adım) olmak üzere üç aşamada incelenebilir.

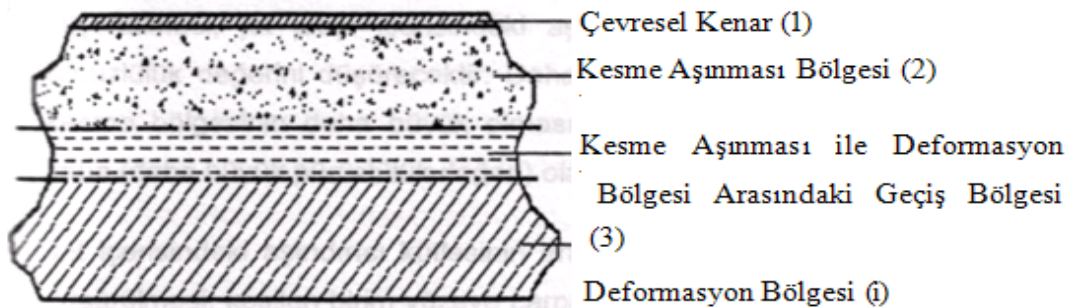
Düzenli kesme işlemine başlanmasıyla parçacık çarpması sonucu oluşan eğik kesme mekanizması devreye girer. Kesmeyle uzaklaştırılan malzeme miktarı, kesme mekanizmasına bağlı olarak ortaya çıkar. Kaldırılan malzeme miktarı, derinlik arttıkça azalırken kesme eğrisi giderek büyür, aşındırıcı parçacık çarpma açısı küçülür, parçadan kaldırılan talaş malzeme miktarı sıfır olduğunda, jet yeni bir işlem çevrimi için "dx" kadar hareket ederken küçük bir kademe meydana gelir. Oluşan kademe daha sonra,

uğradığı daha büyük açılı parçacık çarpma etkisiyle ortadan kalkar. Kesme işlemi boyunca tanımlanan bu işlem tekrarlanarak devam eder.

Birinci kademedeki kesilme tamamlanıncaya kadar jetin, parçanın üst kısmında ikinci adımda malzeme kesilmesi mümkün değildir. Kesme derinliği artıkça kesilen her bir kademenin büyüklüğü de artacaktır. İşlemden jet sapma açısı, bir sonraki kademeye geçinceye kadar artar, bir sonraki kademedede jetin parçaya ilk çarpma açısı, tekrar 90° dir. Kesme işlemi; birbirinden farklı aşamalarda gerçekleşmektedir (Hashish 1984, 1991).

2.8.4.1 Aşındırıcı Su Jeti İle Kesilen Yüzeylerin Özellikleri

Jet ile elde edilen yüzey kalitesini belirleyebilmek için kesilen yüzeylerin görüntüsü incelendiğinde, bu yüzeylerin akışa dayalı farklı yöntemlerle (alevle kesme, lazer kesme., plazma ark ile kesme) elde edilen yüzeylere görüntüde benzedikleri anlaşılır. Yüzey pürüzlülüğü, yüzeydeki dalgalanma ile tanımlanır ve dalganın büyüklüğü ise jet çapı ile orantılıdır (Juo, Louis, Meier, 1993). Dalga boyutları jet çapı ve nüfuziyete bağlı iken yüzey pürüzlülüğü her bir aşındırıcı parça arasındaki mikro işleme sonucu ortaya çıkacaktır. Kesme kalitesi, jete bağlı olan fiziksel iç etkiler ile "düzensiz kesme parametreleri, nozul titreşimi ve iş parçası" gibi dış etkilere bağlı olarak ortaya çıkar. Aşındırıcı su jetiyle kesilen yüzeye bakıldığında, Şekil 2.34'de görüldüğü gibi, üç farklı alan görülecektir (Hashish 1991, Juo, Louis, Meier, 1993).



Şekil 2.34 Aşındırıcı su jetiyle kesilen yüzey bölgeleri
(Hashish 1991, Juo, Louis, Meier, 1993).

Kesilen yüzeyin üst köşesinde, jetten ayrılan parçacıkların çarpmasıyla küçük bir kavis söz konusudur. Bu bölge, çoğunlukla göz ardı edilebilecek bir kenar etkisi olarak kabul edilebilir.

1. Birinci bölge altında ve daha düzgün bir yüzey alanıdır. Bu bölge; yüzeye düşük çarpma açısı ile çarpan aşındırıcı parçacıkların neden olduğu, parçacık erozyonu sonucu oluşur. Kesme aşınması olarak isimlendirilen bu mekanizma, daha sonra detaylı olarak tartışılacaktır. Yapılan deneysel çalışmalar, bu bölgede 1,3 μm kalitesinde yüzey pürüzlülüğü elde edilebileceğini ortaya çıkarmıştır..

2. Aşındırıcıların kinetik enerjilerinin azalmasıyla kesme kabiliyetleri azalır, jet sürekliliğini kaybeder. İkinci bir kesme mekanizmasının baskın olduğu bir geçiş bölgesi ve birbirine paralel jet sapmasına bağlı olarak şekillenmiş hatlardan oluşan yüzey. Bu ikinci kesme mekanizmasında yüzeye çarpan parçacıkların çarpma açısı daha büyüktür ve deformasyon aşınması olarak isimlendirilmektedir. Deformasyon aşınma mekanizması daha büyük açıyla yüzeye çarpan parçacıklar tarafından gerçekleştirilir. Jetin ilerleme hızı düşürüldüğünde, 2. ve 3. bölge arasında yer alan geçiş bölgesi küçülecektir.

Kaliteli bir kesme işlemi yapılması isteniliyorsa parametreler ayarlanarak deformasyon aşınması bölgesine girilmeden kesme yapılmalıdır. Parametrelerin bu tarzda ayarlanmasıyla pullanma da önlenmiş olur. Yeterince düşük bir yanal hızının seçilmesiyle 1. bölgede pullanmadan uzak, oldukça düzgün bir yüzey elde edilecektir. Aşındırıcı parçacık boyutlarının küçültülmesi, jet akışı içerisindeki aşındırıcı kütlesinin artırılması yüzey pürüzlülük değerini düşürecektir. Daha büyük boyutlara sahip bir parçacık, kesme bölgesinin daha büyük olmasına neden olacağından, yüzey daha kaba (daha büyük pürüzlülük değeri) olacaktır (Hashish 1991, Nakamura, Nazaraki, Yanagihara, 1989).

Jet içerisindeki aşındırıcı kütlesinin artırılması veya jet ilerleme hızının da düşürülmesi, kesilen birim yüzeye çarpacak parçacık sayısını arttırarak daha kaliteli yüzeyin elde edilmesini sağlar.

Daha büyük kesme hızlarının kullanıldığı kaba kesme işlemlerinde yüzey üzerinde her üç bölge de görülebilir. Üçüncü bölgede jetin sapması ve birbirine paralel hatların oluşması; yanal hızının değişmesi, aşındırıcı besleme debisi, sıvı basıncı ve seçilen nozul geometrisi gibi parametrelerin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar.

Kaba kesme işlemlerinde aşındırıcılar alt kısmında oyuk ve cepler oluşturarak buralarda birikir veya gömülürler. Parça içerisinde kalan bu kalıntı parçacıklar, işlemlerde nozula zarar verebilirler. Bu olumsuz etkileri göz önünde bulundurulmalıdır. Yüzeyin durumu ile parçadaki tepki kuvvetleri karşılaştırıldığında kesme derinliği arttıkça, jetteki sapma ve buna bağlı olarak parçada tepki kuvvetinin arttığı görülmektedir. Böylece yüzeydeki daha büyük tepki kuvvetleri daha kaba yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalanması ve daha büyük jet sapmasının okluğunu gösterir (Nakamura, Nazaraki, Yanagihara, 1989).

2.8.4.2 Su Kalitesi

Biradan musluk suyundaki mikroskobik parçacıklar, birincil nozul ömrüne zarar verebilirler. Suyu kazanılan süpersonik hızlarda, orifisin kenarlarına parpan parçacıklar keskin kenarları hızlı bir şekilde aşındırır ve jet kalitesini bozar. Bu problem suyun kalsiyum karbonat içerdiği bölgelerde yaygındır. Parçacıklar çökecek ve nozul debisinde azalmaya, engellemeye neden olacaktır (Finucane, Corcoran, 1988).

Kısa nozul ömürleri düzensiz kesme kalitesine neden olur. Böyle bir kusurdan korunmak amacı ile akışkan jet sistemleri için kullanılan belirli su kalitesi standardı Çizelge 2.14'de gösterilmiştir. Genellikle yüksek mineral içermedikçe, Çizelge 9'da ki özellikleri taşıyan musluk suyunun işlenmesine ihtiyaç kalmaz. Üstelik piyasadaki yüksek basınçlı basınç yükselticilerin pek çoğu 0,5 mm' nin altında filtrelemektedir (Finucane, Corcoran, 1988). Filtreler, hafifletici ya da basınç yükselticinin düşük giriş basıncı ile şarj pompası arasına yerleştirilebilir (Hashish, 1984).

Ancak parçacıklar küçüldükçe orifis ömrünün uzayacağını vurgulanmaktadır. Orifis ömrünü artırmak için mikron altı iyonu giderme filtrelemesi yapılabilir.

Çizelge 2.14 Akışkan jet sistemleri için su kalitesi sistemleri (Hashish 1984)

Saf Madde	İzin Verilen Yoğunluk (mg/l)
Silika	1.0
Kalsiyum	0.5
Magnezyum	0.5
Demir	0.1
Manganez	0.1
Klorür	5.0
Sülfat	25.0
Nitrat	25.0
Karbon Dioksit	0.0
Toplam Çözülmüş Katılar	50.0
pH	6.8 ≈ 7.5
özgül İletkenlik	20 kΩcm

Bu yüzden suda asılı parçacıklar mikron altı filtreye tutulurken, çözülmemiş katılarda su deiyonizasyonla geçilir. Aşağıda bazı su işleme metotları özetle tartışılmıştır:

- Yumuşatma, kalsiyumla sodyumun yer değiştirdiği bir reçine yatak ezerinden suyun geçirilmesini içermektedir. Reçine yatağı, farklı bir çevrimde yeniden üretilir ve sodyum sağlamak için tuzla yeniden doldurularak işlem devam eder.
- İyonu giderme devresinde işlem yumuşatmaya benzemekle birlikte, tek farklılık işlemde iyon değişiminin meydana gelmesidir. Yani klorit ve sülfat gibi negatif iyonların hidroksit iyonları ile değiştirilmesi veya sodyum ve kalsiyum gibi pozitif iyonların hidrojenle değiştirilmesi gibi. Sistem sülfürik asit ve kostik sodayla tekrar üretilir.
- Ters ozmos, kaliteli su elde etmede kullanılan diğer bir işlemdir. İşlem moleküller düzeyinde bir süper filtreleme operasyonu gibi davranan bir elemandan

suyun geçirilmesiyle çalışır. Bu yolla su, elemandan geçirilirken, istenmeyen malzemeler dışarı atılır.

Su kalitesi ihtiyaçları; nozul boyutlarının artması ve basınçların azalması ile birlikte düşmektedir. Bu yüzden temizleme operasyonları için çok büyük ilgiye gerek yoktur (Matsui, Matsumura, Ikemoto, 1991)

2.8.4.3 Sıvı Özellikleri

Sıvı jet teriminin kullanılması, sıvı jetle yapılan kesme işleminde kullanılan sıvının sadece su olmadığı gerçeğinin vurgulanmasıdır. Özel uygulamalar için su dışındaki diğer sıvıların kullanılması gerekebilir. Örneğin tıbbi uygulamalarda kesme aracı olarak tuzlu çözeltiler kullanılırken, gıda teknolojisinde kesme aracı olarak yağ da kullanılmaktadır.

Eğer jet içerisine aşındırıcı alınacaksa, bu durumda yoğunluğu aşındırıcı yoğunluğuna eşit olan sıvıların kullanılması aşındırıcı parçacıkların sıvı içerisine alınmasını kolaylaştıracaktır (Matsui, Matsumura, Ikemoto 1991, Labus 1991)

Endüstride, yüzeydeki birikintilerin uzaklaştırılmasında ve temizlik uygulamalarında gazlı jet akımının kullanılması, aşındırıcı parçacıklara daha iyi ivme kazandırarak sonuç üzerinde olumlu etki yaratmaktadır. Bunun yanı sıra parçacıkların yoğunluğu daha büyük olduğundan gazlı akımın kinetik enerjisi aşındırıcı parçacıklara taşıyabilme kabiliyetleri sınırlıdır, bunun doğal bir sonucu olarak, momentum transferi de sınırlı seviyede kalır.

Aşındırıcı parçacık hızıyla sıvı hızının eşit olduğu, sıvı yoğunluğunun parçacık yoğunluğuna yakın olduğu durumda daha büyük momentum transferi sağlanır. Momentum transferindeki bu farklı iki durum, aşındırıcı su jetiyle kesme ve parçacıklara hız kazandırmak amacıyla jet içerisinde havanın da alındığı, aşındırıcı su jetiyle işleme operasyonları arasında açıkça görülmüştür.

Aşındırıcı su jetleri aşındırıcı jetle işleme ile kıyaslanırsa daha fazla miktarda aşındırıcı taşıyarak, daha düzenli jetler oluştururlar. Aynı viskoziteye sahip farklı sıvılarla kesme yapıldığında kesme derinliğinin değiştiği görülmüştür. Bunun nedeni her ne kadar sıvıların viskoziteleri aynı olabilirse de, yoğunluklarının farklı olmasıdır. Yoğunluğu daha fazla olan sıvılarda jet hızı, düşük yoğunluklu sıvılara göre daha düşüktür (Labus 1991, Finucane, Corcoran 1988).

Viskozitesi yüksek sıvılarda türbülans seviyesi düşük olduğundan, suya göre daha düzenli bir jet elde edilir. Ancak yüksek viskoziteli sıvılarla elde edilen jete aşındırıcının karıştırılması ve hız kazandırılması işlemleri tam olarak sonuçlandırılmaz. Yapılan çalışmalarda yağ ile yapılan kesmelerde, kesme derinliğinin daha düşük seviyede kaldığı tespit edilmiştir (Hashish, 1987).

2.8.4.4 Sıvı Basıncı

Su basıncı doğrudan, kesme işleminin, sonradan elde edilmesi gereken kesme kalitesi ve kesme performansına bağlıdır. İşlem planlanırken daha düşük basınç, ünitenin elemanlarının ömrünü arttırıp daha az bakım gerektirirken; daha yüksek basınç, daha düzgün yüzey kalitesiyle daha (Finucane, Corcoran 1988) yüksek talaş kaldırma oranı sağlar. Sadece suyun kullanıldığı jetlerin etkisi yaklaşık olarak doğrusaldır. Aşındırıcı su jetlerinde ise, en sert malzemeleri dahi etkili bir şekilde kesebilecek jet basıncı, 170-310 MPa bulunmuştur (Hashish 1984, VVada, Kumon, 1993).

Yukarıda da belirtildiği gibi, genelde jet basıncı arttırıldığında daha düzgün yüzey ve daha fazla talaş kaldırma oranlarının elde edildiği gözlenmiştir, bununla birlikte jet basıncının oldukça yüksek tutulması durumunda, geçiş hızının veya aşındırıcı akış oranında kararsızlık olacağından, yüzey kalitesi olumsuz etkilenir. Jetin aşındırıcı yüklenmesi ve aşındırıcı taşıma kapasitesi basınç değişiminden etkilenir. Bunun doğal bir sonucu olarak kesme performansının kararlılığı da değişecektir. Suyun basıncının arttırılmasının diğer bir etkisi de, artan basınçlı jet daha da yayılarak, oluşacak vakumu arttırmak, daha fazla miktarda aşındırıcının jet içerisine alınmasını sağlamak ve kesme kabiliyetini arttırmaktır.

Buna ilâve olarak karıştırma verimi, örneğin su jetiyle çıkıştaki aşındırıcı yükü jet arasındaki momentum değişimi, basınç arttıkça yükselir (Hashish 1991, VVada, Kumon, 1993).

2.8.4.5 Sıvı Jet Çapı

Jet çapı, birinci nozul ile ikinci nozula bağlı olarak şekillenir. Nozullarda uygun tasarımla jet, orifisten çıkışa doğru çekilir. Bu çekim, genellikle boşaltma katsayısı (Co) olarak tanımlanır. Daha büyük nozul çapları kullanıldığında, yaklaşık olarak doğrusal bir etki nedeniyle, daha büyük kesme derinliği (beton, alüminyum ve yumuşak çelik) elde edilir.

Güç verimliliği açısından jet çapı ele alındığında, daha küçük jet çapında daha düşük su akış oranı oluştuğundan, daha verimli bir hidrolik güç kullanımı gerçekleştirilmiş olur (Hashish 1991, VVada, Kumon 1993, Labus 1991).

Aşırı büyük çaplı, bunun yanı sıra içerisindeki aşındırıcı oranı düşük jetler; kesme işlemi açısından negatif bir eğilim oluştururlar. Bunun nedeni, içerisindeki aşırı su miktarının, aşındırıcı karışım mekanizmasıyla jetin odaklanması işlemini olumsuz etkilemesidir. Bunun dışında aşırı su miktarı, parçacıkların kesme hedefinden sapmalarına da neden olacaktır. Bu nedenle hidrolik gücün artırılmasıyla jet çapının büyütülmesi işleminde, jet içerisindeki aşındırıcı akış debisi de artırılarak artışın sonuç üzerinde olumlu etki etmesi sağlanabilir. Jet çapı büyüdükçe, daha yüksek oranda, aşındırıcı su debisine ihtiyaç duyulur. Ayrıca servis hatlarında daha fazla basınç kayıplarına neden olacak diğer yandan filtrelerin aşınması nedeniyle filtreleme maliyeti artacaktır (Miranda, Lousa 1993, Hashish 1991, Labus 1991).

2.8.5 Aşındırıcılı Su Jetinde Aşındırıcı Tanenin Etkileşim Özellikleri

Aşındırıcının sisteme girmesi ve ASJ oluşturması sırasında aşındırıcı tanelerinde boyut küçülmesi ve şekil bozulması gibi bazı değişimler meydana gelmektedir. Taneler nozul

içerisine girdiklerinde sahip oldukları hızları ve açılara bağlı olarak karışım odasında çarpma etkisiyle ‘kırılma-ufalanmaya maruz kalırlar. Buradaki boyut küçülmesinin şiddeti, karışım odasının geometrisine, pompa basıncına bağlı olarak aşındırıcı tanelerin sahip oldukları çarpma hızıyla yakın ilişkilidir. Bu hız arttıkça oluşan kırıntıların şeklinin de değiştiği ve keskin köşeli tanelerden kübik-yuvarlak tanelere geçiş gösterdiği tespit edilmiştir (Galecki vd. 1987). Nozula giren aşındırıcı tanelerin %70-80’inin kırılma-ufalanma gösterdiğini, bu sayının da aşındırıcı tane boyu, pompa basıncı ve odaklama tüpü çapıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Aşındırıcı tanenin parçalanıp ufalanması matematiksel eşitlikle şöyle ifade edilebilir:

$$\Phi = 1 - \frac{\bar{d}_\phi}{\bar{d}_g} \quad (9.9)$$

Eşitlikte; Φ , boyut küçülme sayısı, \bar{d}_g , nozul girişindeki ortalama tane boyu, \bar{d}_ϕ , ise nozul çıkışındaki tane boyudur. Granat için Φ sayısının 0.15 ile 0.70 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Φ sayısının 0 olması herhangi bir kırılma veya ufalanmanın olmadığını göstermektedir. Yapılan araştırmada aşındırıcı tane ufalanmasında etkili en önemli parametrelerin pompa basıncı, odaklama tüpü çapı ve aşındırıcı tane çapı olduğu belirlenmiştir. Odaklama tüpü boyu ve aşındırıcı besleme miktarının ufalanmada etkisi olmakla birlikte önemsiz kabul edilebilir. Aşındırıcı malzeme çeşitleri düşünüldüğünde tanelerin çatlakları, zayıf zonları, kapanımları vb. safsızlık ve kusurları da ufalanmayı artırıcı etki yapmaktadır. Martinec (1994) aşındırıcı tane şekillerindeki değişimi incelemiş ve tanelerin sahip olduğu şekil faktörünün nozuldan çıktıktan sonra düşüş gösterdiğini tespit etmiştir. Taneler küresellikten veya yuvarlaklıktan uzaklaşmaktadırlar.

3. MATERYAL METOD

3.1 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

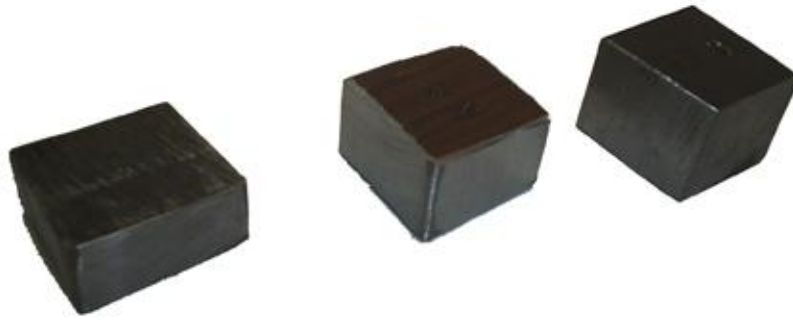
Yapılan deneysel çalışmalarda, imalat sanayinde üretimle ilgili her aşamada yaygın olarak kullanılan farklı sertlik ve kimyasal özelliklere sahip malzemelerden; 20x20x10 mm ölçülerinde St 37, 20x20x20 mm ölçülerinde St 50 ve 20x20x15 mm ölçülerinde Hardox 500 Alaşımli Çelikler kullanılmıştır. (Resim 3.1) Deneyde kullanılan alaşımli çeliklerin kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Alaşımli çelik malzemelerden hazırlanan numuneler, ileri kesme teknolojilerinden plazma, lazer, tel erozyon ve aşındırıcılı su jeti (AWJ) yöntemleri ile kesilmiştir. Kesme işlemleri sırasında kesim için kullanılan makine ve ekipmanlarının özelliklerine bağlı olarak teknik inceleme yapılmış ve kesim kullanılan makinelere ait parametreler kesim süresi ve sarf malzemelerinin detaylı olarak dökümü alınmıştır.

Farklı kesme yöntemleri ile kesilen numunelerin yüzeylerinin mikro yapı fotoğrafları ile orijinal numunelerin mikro yapı fotoğrafları karşılaştırılarak farklı kesme yöntemlerinin malzemenin metalürjik yapısı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Ayrıca farklı yöntemlerle kesilen numunelerde, kesme kenarından çekirdeğe doğru sertlik ölçümleri yapılarak elde edilen grafikler üzerinde sertlik değişiminin etkileri incelenmiştir.

Kesme yüzeyine komşu yüzeyler farklı metalografik işlemlere tabi tutulmuş ve son olarak alümina ile parlatma yapılmıştır. Kesilen malzemelerin Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi metalografi laboratuvarlarında mikro yapı fotoğrafları çekilmiş ve TUAM’da mikro sertlik ölçümler yapılarak deney için gerekli analiz sonuçları elde edilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Özellikleri

Malzeme Cinsi	Kimyasal Bileşimi (%)									
	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	B
St 37	0,17	0,40	0,50	0,040	0,050	0,007				
St 50	0,34	0,30	0,50	0,050	0,050	0,009				
Hardox 500	0,30	0,60	1,70	0,025	0,010		0,80	0,80	1,00	0,005



St 37

Hardox 500

St 50

Resim 3.1 İşlenmemiş Numuneler



St 37



Hardox 500



St 50



St 37



Hardox 500



St 50



St 37



Hardox 500



St 50



St 37



Hardox 500



St 50

Resim 3.2 Kesilmiş Malzemelerin Kesme Yüzeyi Fotoğrafları

3.2 Kesme İşleminde Kullanılan Tezgahlar ve İlgili Parametreler

3.2.1 Plazma İle Kesim Tezgahı

Malzemeleri kesimlerinde Dörtüol Makine firmasının Veska B 1500X üç eksenli CNC ve Plazma Kesim Tezgâhı kullanılmıştır. Tezgahın teknik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 CNC Oksijen ve plazma ile kesim için kullanılan tezgaha ait teknik bilgiler

VESKA B Serisi Alevli Plazma Kesim Tezgahı Teknik Özellikleri		
MODEL	VESKA B.1500	VESKA B.1500X
Max. Kopyalama genişliği	1500 mm.	1500 mm.
Max. Kopyalama boyu	2000 mm.	2000 mm.
Max. Kesme genişliği	2000 mm.	2000 mm.
Max. Kesme boyu	3000 mm.	6000 mm.
İlerme mm./dakika	50-1750 mm./dk.	50-1750 mm./dk.
Optik okuyucu	HL93 Linatrol	HL93 Linatrol
Kopya hassasiyeti	(+-) 0.25 mm.	(+-) 0.25 mm.
Şaloma kapasitesi	3-4	3-4
Voltaj	AC 220V 50-60HZ	AC 220V 50-60HZ
Kesme Kalınlığı	200 mm. 1. Şaloma 100 mm. 2. Şaloma 80 mm. 3. Şaloma 50 mm. 4. Şaloma	

3.2.2 Lazer İle Kesim Tezgâhı

Malzemelerin lazer ile kesimi için Yörükoğlu firmasındaki BYSTRONIC-By Vention 3015 marka üç eksenli CNC Lazer Kesim Tezgâhı kullanılmıştır. Tezgâha ait teknik bilgiler Çizelge 3.3’de sunulmuştur.

Çizelge 3.3 Lazer Kesim İçin Kullanılan Tezgaha Ait Teknik Bilgiler

CNC LAZER KESME TEZGÂHI ByVention 3015	
Lazer performansı	4400 W
Levha ebatları (boy x genişlik)	3000 x 1500 mm 2500x1250 mm 2000x1000 mm
Kesme alanı	X = 1562 mm Y = 772 mm Z = 100 mm
Maksimum pozisyonlama hızı-paralel akslarda x.	100 m/dak
Maksimum pozisyonlama hızı-bileske akslarda	140 m/dak
Pozisyonlama hassasiyeti Pa	±0.1 mm
Tekrarlama hassasiyeti Ps	±0.05 mm
Tezgah ağırlığı	14600 kg
Zemin	endüstriyel zemin
Kesme kafası 7.5"	dahil
Kesme gazı tüketimi	malzemeye göre değişir
Panel vasıtasıyla operasyon	dokunmatik kontrol paneli
Sürücüler	manuel kontrol Ünitesi Üzerinde USB 1.1
Netvork bağlantısı	RJ45 konnektörü 10/100 MBit/s
ByVision (Belirtiler için bkz. avrı veri sayfası)	opsiyonel
CO ₂ rezonatör	ByLaser 4400
Çıkış gücü	4400 W
Dalga boyu	10.6 µm
Polarizasyon	dairesel
Darbe frekansı	1-2500 Hz
Maksimum levha kalınlıkları	
Siyah çelik	8 mm
Paslanmaz çelik	8 mm
Alüminyum	8 mm
Toplam sistemin maksimum elektrik tüketimi	57 kW

3.2.3. CNC Tel Erozyon Kesim Tezgahı

Malzemenin tel erozyon ile kesilmesinde kalıpsan sac-metal kalıpcılığı firmasının Sodick AQ 535 L 550x350x300 (z) mm CNC Tel erozyon kesim tezgahı kullanılmıştır. tezgaha ait teknik bilgiler; Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Cnc Tel Erozyon Tezgahı Teknik Özellikleri

PARAMETRELER	BİRİMİ	DEĞERLER
Kesme Hızı	mm/dak	120
X Ekseni hareketi	mm	350
Y Ekseni hareketi	mm	320
Z Ekseni hareketi	mm	150
U Ekseni hareketi	mm	18
V Ekseni hareketi	mm	18
Tabla Ölçüleri	mm	650x430
Çalışma Tankı Parça Ölçüleri	mm	960x650x120
Maksimum Parça Ölçüleri	mm	630x400x200
Maksimum Parça Ağırlığı	Kg	170
Pozisyonlama Hassasiyeti	mm	0,01
Tekrarlama Hassasiyeti	mm	0,005
Maksimum Çalışma Akımı	A	8
Tel Çapı	mm	0,12-03
Pürüzsüz Yüzey Hasasiyeti	µm	2,5
Maksimum Konik Kesme Açısı	Derece	3°(H=50)
Dionize Şişesi	L	50
Dielektrik Filtre Kartuşu	Adet	1
Ünite Filtre Hasasiyeti	mm	0,001
Elektrik	V	380V-50Hz
Toplam Güç	KW	2
Değişik Gereçler	V	220
Tezgahın Ölçüleri	mm	1220x1615x1650
Tezgahın Ağırlığı	Kg	1600

3.2.4. Aşındırıcılı Su Jeti Kesim Tezgahı

Malzemelerin aşındırıcılı su jeti ile kesilmesinde Metronom firmasının QMAX Aşındırıcılı Su Jeti Tezgahı kullanılmıştır. Tezgah vr basınç ünitesine ait teknik özellikler Çizelge 3.5’te verilmiştir. Tezgahta kullanılan aşındırıcının kimyasal ve mineral bileşimi Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 Aşındırıcılı su jeti kesme tezgahı ve basınç ünitesi teknik bilgileri

Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme Tezgâhı Teknik Özellikleri			
Kontrol sistemi	Olimpus CNC yazılımı, CAD dosyalarının bilgisayar üzerinden aktarılması ile işlemler yapılmaktadır.		
Tahrik Sistemi	AC S motor		
İlerleme (yanal) hızı aralığı	0-8000 mm/dak		
Tabla Çalışma Ölçüleri	x, y, z eksenleri sırasıyla 1350 X 2500 X 220 mm		
Üç eksen de ilerleme hızı	8000 mm/dak		
Doğrusal ve Dairesel hareket hassasiyeti	0.01mm, 0.1°		
Sistemde kullanılan pompa	SL-V 100 HP Yüksek basınç pompası, yükseltici tipindedir		
Pompa piston çapı	30 mm		
Yükseltici çalışma basıncı	minimum 35 bar – maksimum 200 bar		
Basınç yükseltme kapasitesi	1/20 oranında		
Elektrik Motoru kapasitesi ve Enerji Tüketimi	22 kw, 58 kwh		
Su ile Aşındırıcı parametreler			
Su tüketimi	3 – 6 l/dak		
Suyun basınç yükselticiye giriş basıncı	8 bar		
Suyun basınç yükselticiden çıkış basıncı	40 bar		
Sistemde kullanılan suyun çalışma sıcaklığı	min: 0°C mak: 45 °C çalışma sıcaklığı		
Yükseltici çalışma basıncı	250 bar	Suyun nozula giriş çapı	0.25 mm
Aşındırıcılı suyun nozuldan çıkış çapı	1.1 mm	Aşındırıcının nozula giriş çapı	0.80 mm
Suyun debisi	3 6/dak	Nozul uç malzemesi	Safir
Suyun nozuldan çıkış hızı	900 m/s	Suyun çıkış anındaki basıncı	≈ 4150 bar
Su tüketimi	3 l/dak	Kesme anında oluşan ısı	55 °C
Çalışma anında çektiği akım	380 V	Tüketilen enerji	62 kwh
Tüketilen aşındırıcı miktarı	235 g/dak	Kullanılan aşındırıcı	GMA Garnet

Çizelge 3.5 (Devam) Aşındırıcılı su jeti kesme tezgahı ve basınç ünitesi teknik bilgileri

AWJ Pompa Teknik Özellikleri		
Parametreler	Birim	SL-V 60
Tanımlanan Güç Değeri	kW/PS	45/60
Basınç Sınırı	bar/psi	4150
Maksimum Akıcılık Değeri	l/min	3.7
Tanımlanmış Motor Akımı 400 V/50 HZ	A	80
Maksimum Devir 400 V/50 HZ	A	100
Kontrol Sistemi		CNC
Voltaj	VDC	24
Kesme Basıncı	bar/psi	30-60
Maksimum Tanımlanmış Darbe Değeri	l/min	54
Akümülatör Kapasitesi	I	2
Maksimum Yağ Basıncı	bar/psi	3400
Yağ Tankı Kapasitesi	l	182
Hidrolik Pompa Değeri 50 Hz	l/min	101
Soğuk Su Basıncı	bar/psi	7 / 130
Sulu Ortam Sıcaklığı	C ⁰	5-45
Pnömatik Besleme Basıncı	bar/psi	5.9/85
Yüksek Basınç Bağlantısı	UNF	9/16 ‘‘
Alçak Basınç Bağlantısı	NPT	1/2 ‘‘
Akıntı Bağlantısı	NPT	1/2 ‘‘
Maksimum Gürültü Seviyesi	db(A)	≤ 77.5
Genişlik	mm	914
Yükseklik	mm	1.453
Ağırlık	Kg	1.542
Basınç yükseltici		Standart
Sızdırmazlık Teknolojisi		Standart
Boşaltma Emniyeti		Standart
Akış Kontrol Valfi		Standart
Filtre		Standart
Yağ Değiştirici		Standart
Yağ Sıcaklık Sensörü		Standart
Güçlendirici Pompa		Standart
Başlatıcı		Standart

3.3 Aşındırıcılar ve İlgili Parametreler

Aşındırıcılı su jeti sistemlerinde yaygın kullanıma sahip olan GMA Garnet, Barton, Garnet ve Power Garnet aşındırıcılarından bu çalışmada GMA Garnet kullanılmıştır. Bu aşındırıcının kimyasal özellikleri Çizelge 3.6'da, mineral bileşimleri Çizelge 3.7'de, fiziksel özellikleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.6 GMA Garnet aşındırıcının kimyasal ve mineral bileşimi

KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
SiO ₂	% 36
Al ₂ O ₃	% 20
FeO	% 30
Fe ₂ O ₃	% 2
TiO ₂	% 1
MnO	% 1
CaO	% 2
MgO	% 6
Kloroid	% 0,0025 den az
Fe(Serbest Demir)	% 0,001 den az
Cu	% 0,001 den az
S	% 0,001 den az
Ağır Metal	% 0,001 den az
Akıcılık	% 10-15 ms/ m (mx 25 ms/m)

Çizelge 3.7 Mineral Bileşimi

Garnet	% 97-98
Limentit	% 1-2
Zirkon	% 0,2'den az
Quarz	% 0,5'ten az
Diğer	%0,25'tenaz
Radyoaktiflik	Yok
Rutubet emişi	Su tutmaz
Toplam klorid	% 10-15ppm
Serbest demir	% 0,01'denaz
Bakır	%0,01'denaz
Diğer ağır metaller	% 0,01'denaz
Sülfür	% 0.01'denaz
Akıcılık	% 10-15 ms/ m (mx 25 m s/m)

Çizelge 3.8 Fiziksel Karekteristik

Hacimsel Yoğunluk	2,3 T/kg
Özgül Gravite	4,10
Sertlik	7,5-8 [Mohs]
Erime Noktası	1250 C ⁰
Doğal Şekli	Keskin Köşeli Düzensiz Şekil
Dayanım	Sert ve Gevrek
Yapışma	Düzensiz
Renk	Kırmızı ve Tonları
Şeffaflık	Yarı Saydam
Yüzey Pürüzlülüğü	Düzensiz çizgiler

3.4 Kullanılan Ölçü Aletleri ve Görüntüleme Cihazları

Kesilen yüzeylerin sertlikleri "SHUMAZU" sertlik ölçme cihazında "HV0.5" değeri ile ölçülmüştür. Kesilen yüzeylerin "OLYMPUS BX-60 Model " mikroskobu ve "Intel Core 2 Duo PC" de Tv kartı ve yazılımı" yardımıyla mikro yapıları 200 ve 500 kat büyütülerek fotoğrafları çekilmiştir.

3.5 Deneysel Metot

3.5.1 AWJ İle Kesilen Yüzeylerin Metalürjik Yapılarında Meydana Gelen

Değişimler Sonucu Sertlik Analizlerinin İncelenmesi

Bu çalışmada, geleneksel olmayan değişik kesme yöntemleri sonucu kesilen parçaların kesme yüzeyinde ve yüzeyden geriye doğru bölgelerde meydana gelen sertlik ve mikro yapı değişiminin incelenmesi ve en avantajlı kesim yönteminin aşındırıcılı su jeti ile kesme olduğunu ortaya koymak esas alındığından, parametreler;

- Hidrolik parametreler;
- Pompa basıncı,
- Orifis çapı,
- Su debisi
- Aşındırıcı parametreleri;
- Kütlesel debisi,
- Parçacık çapı, parçacık boyut dağılımı, parçacık biçimi, parçacık sertliği, yeniden kullanılabilme kapasitesi, aşındırıcı şartları
- Karıştırma ve ivmelendirme parametreleri; Odaklama çapı veya karıştırma borusu çapı, odaklama boyutu veya karıştırma borusunun uzunluğu
- İşleme parametreleridir.

3.5.2 Farklı Kesme Yöntemlerinin Malzeme İç Yapısında Oluşturduğu Yapısal

Değişikliklerin İncelenmesi

Aşındırıcılı su jetiyle kesme yönteminin diğer kesme yöntemleriyle karşılaştırılması için, Bölüm 3.1'de belirtilen, 10-15-20 mm kalınlığındaki numuneler AWJ'nin de dahil olduğu geleneksel olmayan işleme yöntemlerinden; Plazma, Lazer ve Tel Erozyonla kesilmiştir.

Farklı kesme yöntemleriyle kesilen malzemelerin değişen sertlik değerlerini ve yüzeyle birlikte içyapılarında kesme yönteminden kaynaklanan yapısal bozulma ve değişimlerini incelemek amacıyla, kesilen numunelerin kesme yüzeyine komşu olan kenarları, farklı tane boyutlarındaki SiC taneler içeren ve döner disk üzerine yerleştirilen 240-360-400-600-800-1000-1200 lük zımparalarla temizlenmiştir. Temizleme ve parlatma işlemleri kesme yüzeyine komşu yüzeye uygulanma nedeni kesme yüzeyine ait kenardan içeriye sertlik değişimini incelemektir. Taban ve incelemelerin yapılacağı yüzey birbirine paralel oluncaya kadar işlem sürdürülmüştür.

Parlatma işlemi için; aşındırıcı olarak alümina tozu ve elmas pasta kullanılmıştır. Bu aşındırıcılar disk üzerine yapıştırılmış çuhaların üzerine döküldükten sonra, diskin dönüş yönünün tersine yuvarlak halkalar oluşturacak şekilde veya diskin merkezinden çevresine doğru ileri geri hareket ettirilerek ve hafif bastırılarak parlatma işlemi yapılmıştır. Parlaklık tamamen sağlandıktan sonra dağlanıp incelenecek yüzey su ve alkolle yıkanarak temizlenmiştir.

Bu işlemler metalografik incelemeler için arzu edilen yüzey elde edilinceye kadar tekrarlanmıştır. Her bir parlatılmış malzeme, yüzey yapıların ortaya çıkarılması amacıyla, % 3 lük nital ile dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Çizelge 3.9'da daldırılan malzemeler ve süreleri verilmiştir.

Çizelge 3.9 Kesme Kenarına Komşu Yüzeylerde Kullanılan Dağlayıcı ve Malzeme Daldırma Süreleri

Malzeme	Dağlayıcı	Kullanım Şekli
St 37	%3 Nital	3 Saniye süreyle daldırma
St 50	%3 Nital	4 Saniye süreyle daldırma
Hardox 500	%3 Nital	6 Saniye süreyle daldırma

Dağlama işleminden sonra incelemeye tabi tutulacak yüzey saf su ve alkol ile yıkanarak temizlenmiştir. Dağlanan malzemeler, optik mikroskop altında incelenerek 200 ve 500 kat büyütülerek mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir.

Malzemelerin mikro yapılarındaki değişimlerin gözlemlenebilmesi için kesme yönteminden etkilenmeyen, bir noktadaki mikro yapı ile kesme kenarında oluşan yapı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

İnceleme sonucu farklılıkları bulmak için, her malzeme yüzeyinden üç farklı bölgeden ve 2 farklı büyültme ile çok sayıda fotoğraf alınmış ve kesme yönteminin malzeme yapısında oluşturduğu deformasyon ve sertlik değişimleri bu fotoğrafların tamamının incelenmesi sonucunda tespit edilmiştir.

Mikro yapıları incelenen malzemelerin sertlik ölçümleri Vickers sertlik ölçme cihazı ile yapılmış ve elde edilen sonuçlar grafiklere aktarılmıştır. Aynı numunelerde, kesme kenarından çekirdeğe ikişer milimetrelik aralıklarla sertlikleri ölçülerek, kesme kenarından çekirdeğe doğru sertlik değişimleri belirlenmiş ve bu değişimlere bağlı olarak farklı yöntemlerin etkileri değerlendirilmiştir.

4. BULGULAR

4.1 Aşındırıcılı Su Jeti İle Kesilen Farklı Kalınlık ve Sertlikteki Malzemelerin

İçyapılarındaki Değişimlerin Değerlendirilmesi

Üçüncü bölümde konu edilen St 37, St 50 ve Hardox 500 alaşımlı çeliklerden hazırlanan 10, 15, 20 mm kalınlığındaki numuneler geleneksel yöntemlerin dışında kesme uygulamalarından olan plazma, lazer, tel erozyon ve aşındırıcılı su jeti ile kesilmişlerdir.

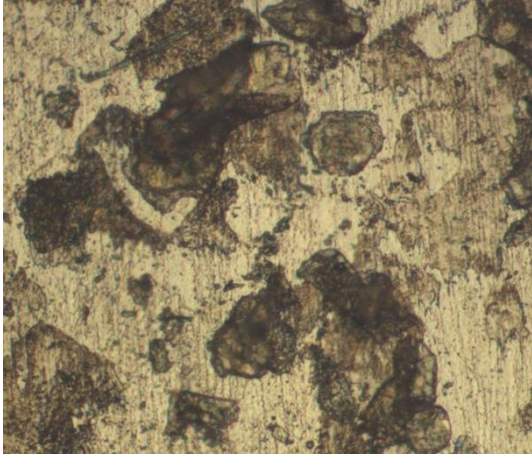
Farklı sertlik ve kullanım alanına sahip numunelerin kesilme işlemleri sırasında sıcaklık değişimlerinin parça dış yapısında ne gibi değişiklikler yaratacağı gözlenmiş sonuçlar mikro ölçümlerle karşılaştırılmıştır.

Kesme işlemleri tamamlandığında süre, çalışma sıcaklığı, ilk yatırım ve sarf malzemelerinin maliyeti dikkate alındığında en avantajlı ve düşük maliyetli kesme işleminin aşındırıcılı su jeti ile kesmede gerçekleştiği tespit edilmiştir.

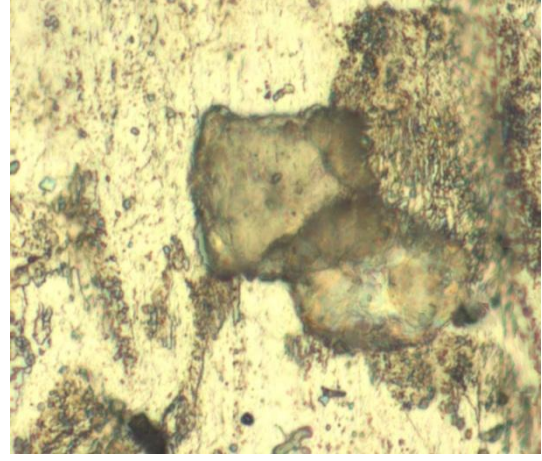
Kesme sonucunda elde edilen yüzeylerin komşu yüzeyleri parlatılarak iç yapı incelemesine tabi tutulmuşlardır. Mikro film ve sertlik ölçme işlemlerinden sonra, malzemelerde kesme yöntemlerine bağlı olarak meydana gelen sertlik ve yapısal değişimler değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Çekilen mikro filmler incelendiğinde deneyde kullanılan malzemelerin orijinal içyapıları ile aşındırıcılı su jetiyle kesme işlemi malzeme iç yapısında ve sertliğinde kayda değer bir değişimin söz konusu olmadığı tespit edilmiştir. (Resim 4.1, 4.2)

Diğer kesme yöntemlerinde ise uygulanan işlemde kaynaklanan bir ısı meydana geldiği için malzemelerin iç yapılarında soğuma şartlarına bağlı olarak iğneli yapı yani martenzitik bir iç yapı oluştuğu tespit edilmiştir. (Resim 4.3, 4.4, 4.5)



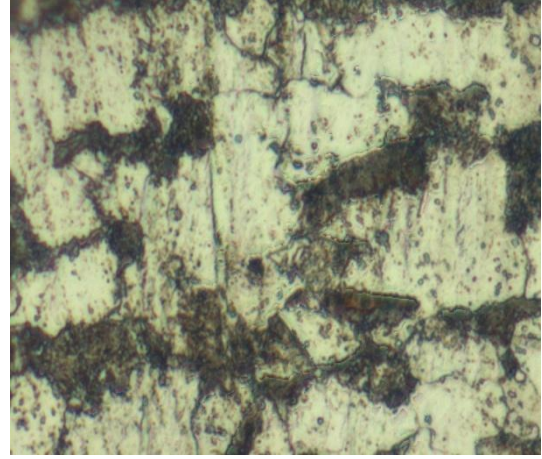
a) St 37 Alaşımlı Çelik 200 Kat Büyütülmüş



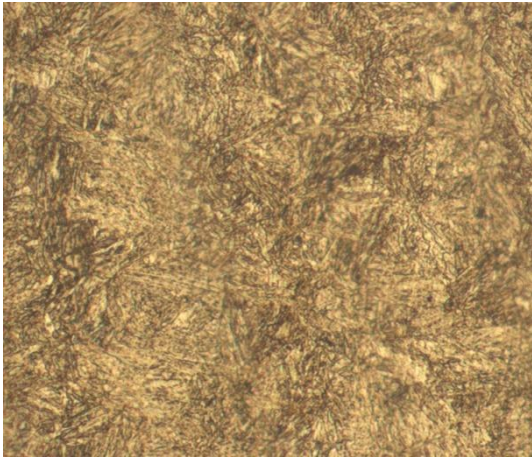
b) St 37 Alaşımlı Çelik 500 Kat Büyütülmüş



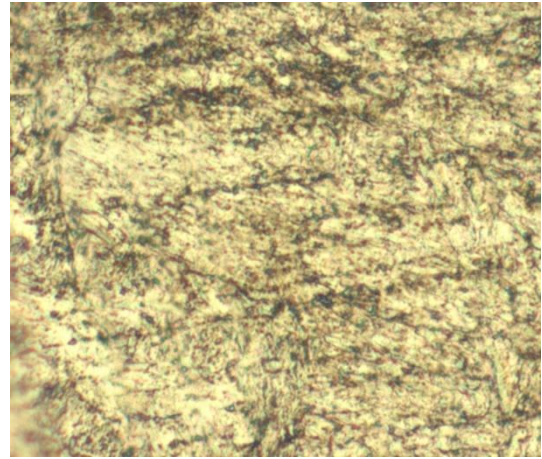
c) St 50 Alaşımlı Çelik 200 Kat Büyütülmüş



d) St 50 Alaşımlı Çelik 500 Kat Büyütülmüş

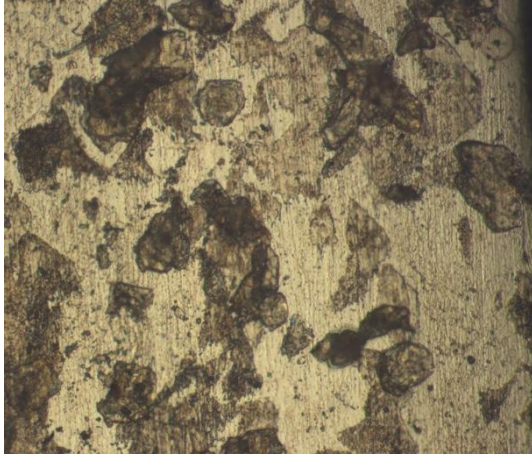


e) Hardox 500 Alaşımlı Çelik 200 Kat Büyütülmüş

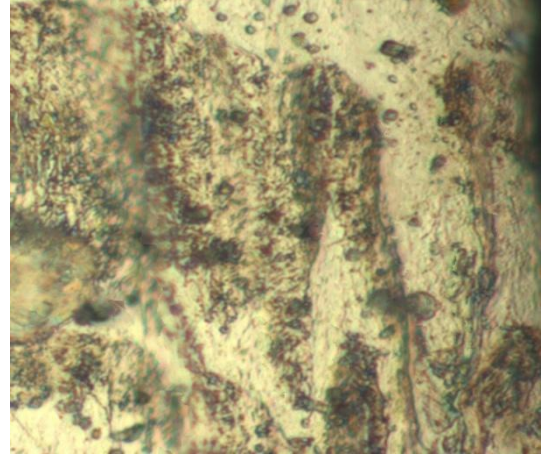


f) Hardox 500 Alaşımlı Çelik 500 Kat Büyütülmüş

Resim 4.1 İncelenen malzemelerin farklı yöntemlerle kesilmesinden önceki orijinal mikro yapı fotoğrafları.



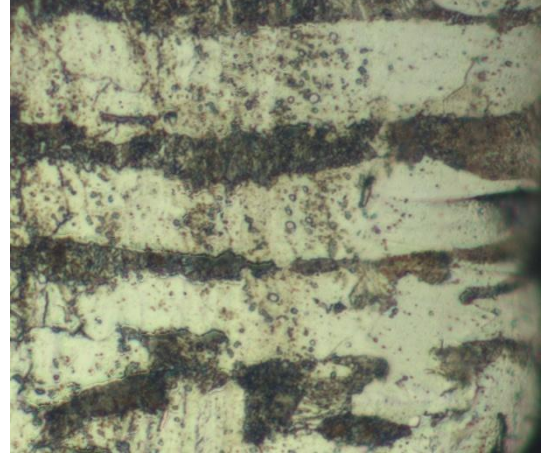
a) St 37 Su Jeti İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



b) St 37 Su Jeti İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



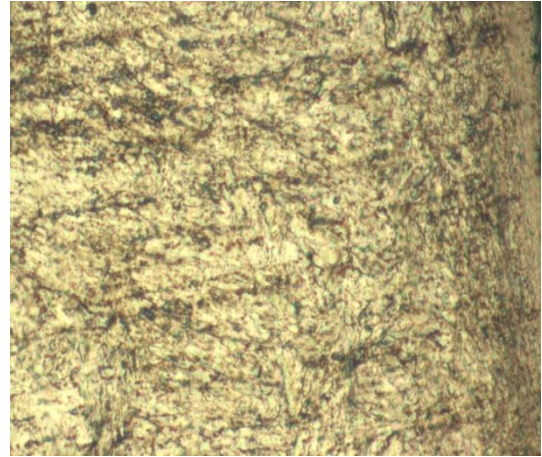
c) St 50 Su Jeti İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



d) St 50 Su Jeti İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



e) Hardox 500 Su Jeti İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş

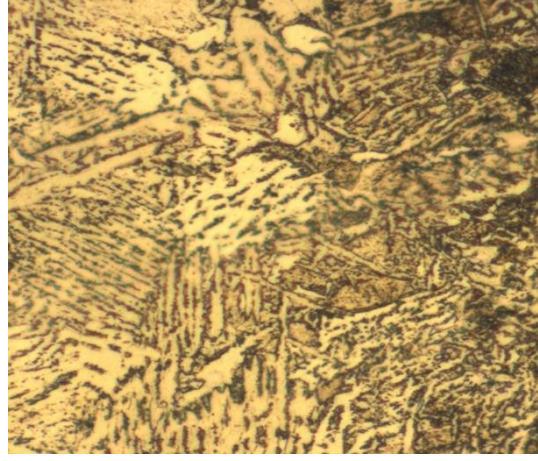


f) Hardox 500 Su Jeti İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş

Resim 4.2 Alaşımli çeliklerin su jeti kesme yöntemi ile kesilmesiyle elde edilen kesme kenar ve yüzeylerinin mikro yapı fotoğrafları.



a) St 37 Plazma İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



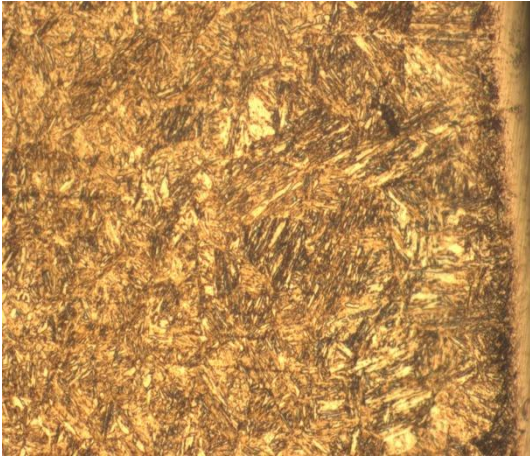
b) St 37 Plazma İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



c) St 50 Plazma İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



d) St 50 Plazma İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş

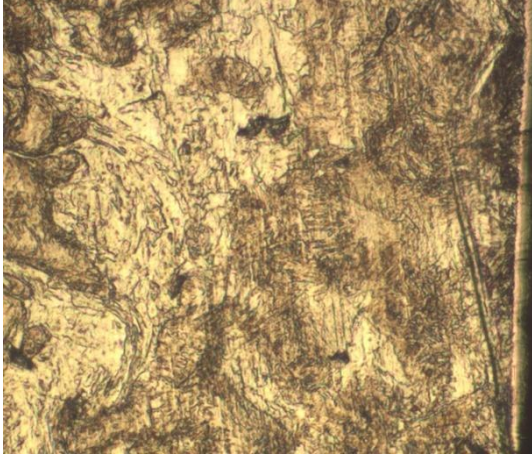


e) Hardox 500 Plazma İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş

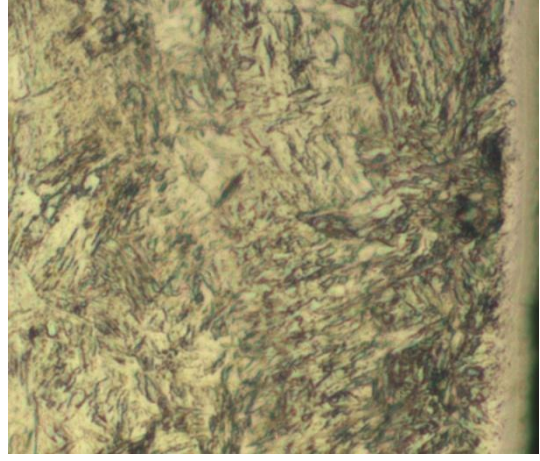


f) Hardox 500 Plazma İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş

Resim 4.3 Alaşımli çeliklerin plazma kesme yöntemi ile kesilmesiyle elde edile kesme kenar ve yüzeylerinin mikro yapı fotoğrafları.



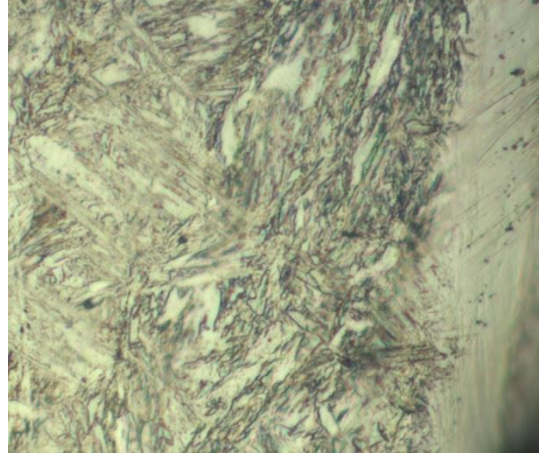
a) St 37 Lazer İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



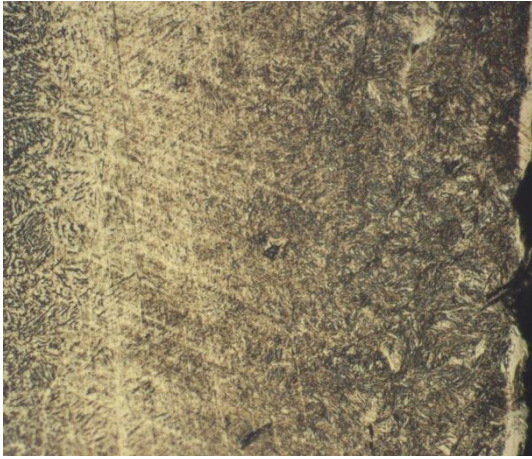
b) St 37 Lazer İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



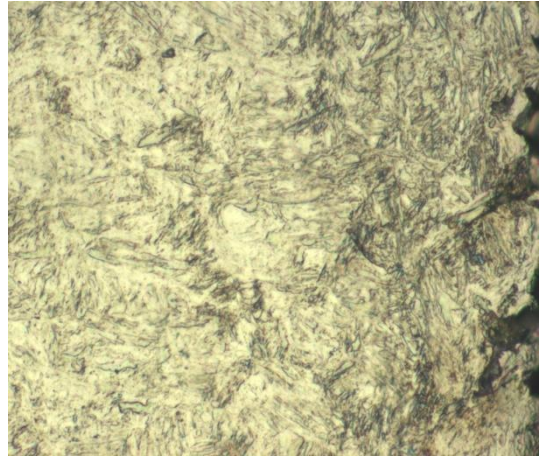
c) St 50 Lazer İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



d) St 50 Lazer İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



e) Hardox 500 Lazer İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş

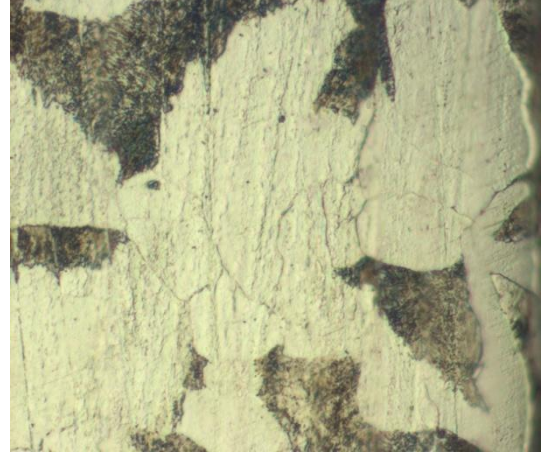


f) Hardox 500 Lazer İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş

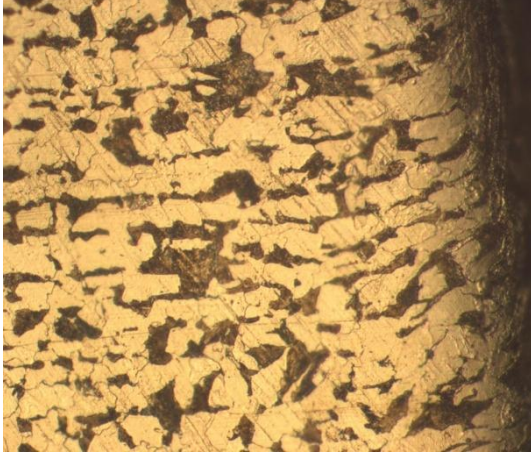
Resim 4.4 Alaşımli çeliklerin lazer kesme yöntemi ile kesilmesiyle elde edilen kesme kenar ve yüzeylerinin mikro yapı fotoğrafları.



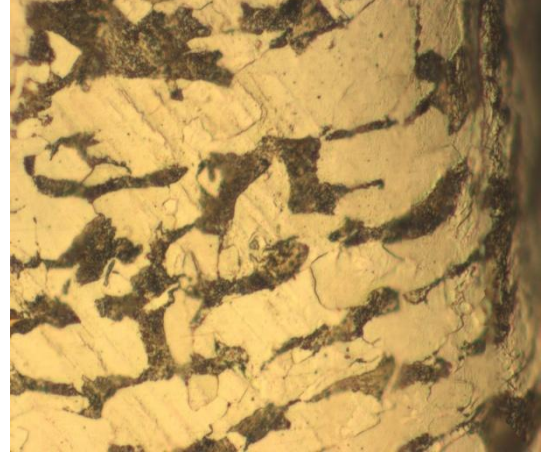
a) St 37 Tel Erozyon İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



b) St 37 Tel Erozyon İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



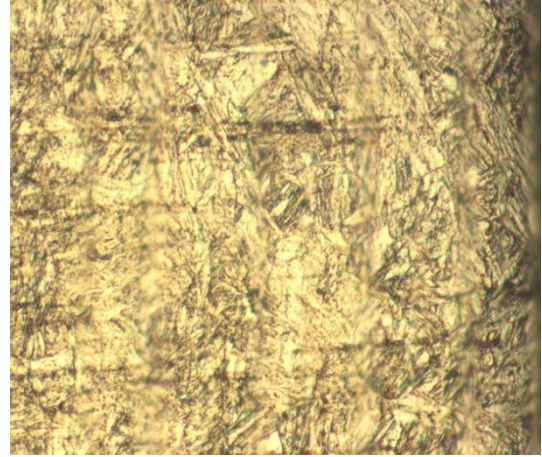
c) St 50 Tel Erozyon İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



d) St 50 Tel Erozyon İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş



e) Hardox 500 Tel Erozyon İle Kesme 200 Kat Büyütülmüş



f) Hardox 500 Tel Erozyon İle Kesme 500 Kat Büyütülmüş

Resim 4.5 Alaşımli çeliklerin tel erozyon kesme yöntemi ile kesilmesiyle elde edilen kesme kenar ve yüzeylerinin mikro yapı fotoğrafları.

Numunelerden kesme yüzeyinden itibaren 2, 4, 6 mm mesafelerden elde edilen mikro yapı fotoğrafları ve sertlik değerleri analiz edildikten sonra grafik haline getirilmiştir. Mikro fotoğraflarda eldeki görüntülerle sertlik değişimleri irdelenerek numunelerde değişik kesme yöntemlerine bağlı olarak oluşan içyapı değişiklikleri ve sertliklerdeki farklılıkların paralelliği incelenmiştir.

4.2 AWJ ile Farklı Kesme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Aşındırıcı su jeti ile kesme yöntemlerinin diğer kesme yöntemleri ile karşılaştırılması için, 10 mm kalınlığında St 37, 20 mm kalınlığında St 50 ve 15 mm kalınlığında Hardox 500 çelikleri kullanılmıştır.

Plazma ile kesme yönteminin temeli, malzemelerin ergime sıcaklığına kadar varan sıcaklıklarda kesilmesi esasına dayanmaktadır. Uygulanan enerjinin ve soğuma şartlarının farklı olması, bu yöntemlerde elde edilen farklı metalürjik özellikleri ve sertlik değerlerini oluşturmaktadır. Bu nedenle; eğilimlerden de anlaşılacağı üzere, malzemenin metalürjik özelliklerindeki etkilerine bağlı olarak sertliklerinde de bir değişime neden olduğu görülmektedir. Malzemelerin kesilme anında plazma gazının etkili olduğu bölgede yüksek sıcaklık oluşmaktadır. Bu yüksek sıcaklık malzemede yapı değişikliğine sebep olmaktadır.

Plazma kesimlerde kesme hattı çizgileri pürüzlülük değerini direkt olarak etkiler. Kesme hattı çizgilerinin oluşturduğu dalgalanmalar yüzey kalitesini bozduğu gibi hassas işlerde işlem tekrarını gerektirir. Üst kesme kenarı yuvarlaklığı plazma kesimin en belirgin özelliğidir. Malzemenin üst yüzeyinin plazma arkı ile daha uzun süre temas etmesi sonucu oluşan bu yuvarlaklık yüzey kalitesi bakımından olumsuz etki yaratmaktadır. Bu yuvarlaklık düşük kalınlıklardaki malzemelerde daha çok belli olur.

Plazmanın ergittiği malzemenin, eridikten sonra tekrar katılaşarak malzemenin alt kesme yüzeyinin kenarına yapışarak çapak oluşumuna neden olması sistemin diğer kesme yöntemlerine göre dezavantaj sayılabilecek bir durumdur. Plazma ile kesim sisteminde çok hızlı veya çok yavaş kesimlerde bile çapak oluşması kaçınılmaz olabilir.

Kesme esnasında meydana gelen kesme aralığı tezgâha bağlı bir çok parametrenin ve kullanıcının uyumuna bağlı olduğu için malzeme kaybı ve pürüzlülük değeri artışı göze çarpmaktadır. Kesme işlemi sırasında üst serpintiden dolayı kesilen parçanın üst bölgesinde çapak oluşmasına neden olur.

Plazma ile kesme esnasında kesilen malzemenin kesme yüzeyi ergime noktasına kadar geldiği için deneysel olarak kullanılan malzemelerde en çok iç yapı değişikliği bu yöntemde olmuştur. Kesme zamanı kısa olmasına rağmen hassas yüzey kalitesi elde edilmesi konusunda sorunlar yaşanmaktadır. Kesilen parça üzerinde kesme ve soğuma şartlarına bağlı olarak içyapı ve sertlik değişimleri çok fazla olduğu için malzeme üzerinde kullanım alanına kadar birkaç işlem daha yapmak gerekebilir. Bu da hem işlem zamanı hem de maliyet bakımından su jetinin açık olarak tercih edilmesine neden olmaktadır.

Lazerle kesim yönteminde malzemenin kesim kenarına yakın bölgelerde aşırı sertlik değişimi meydana geldiği için malzeme kesme kenarına yakın bölgede ikinci bir işlem yapılması son derece zor olmaktadır. Bu nedenle birden fazla işlem gerektiren malzeme kesimlerinde kısıtlı imkân sunmaktadır. Kesim kalınlığının sınırlı olması ve malzemeye göre meme değişimi gerektirmesi ve parametrelerin girilmesi işlem zamanını uzatmaktadır. Ayrıca çok yakın kesimler yapılamadığından artık malzeme oluşmaktadır. Makinenin ilk yatırım maliyeti yüksek olduğu gibi, işleme maliyetlerinin yüksek olması da en önemli dezavantajıdır.

Lazer ile kesme yönteminde kesilen bölge çevresine çapakların yapışmaması için yağ sürmek gerekir. Bu da işlem sonrasında malzeme yüzeyinde ikinci bir temizleme işlemine sebep olmaktadır. Lazerle kesmede, paslanmaz çeliklerin ve kaplamalı metallerin kesilmesi kesme kalınlığının düşmesine neden olduğu için sınırlamalar getirmektedir.

İlk yatırım maliyetinin çok yüksek olması ve kesme kalınlığının diğer kesme yöntemlerine göre daha sınırlı olması bu kesme yönteminin en önemli dezavantajlarından. Lazerle kesme yöntemi kesme bölümünde malzemenin ergime sıcaklığına yakın meydana getirdiği için kesme kenarına yakın bölgelerde yüzey pürüzlülüğü artmakta ve hassas işler için işlem basamaklarının sayısı değişmektedir.

Tel Erozyon İle Kesimde kesme kalıplarında çok kullanılan bir işleme yöntemidir. Kesme işlemi esnasında kalıntı gerilmeler çatlak oluşumuna neden olur. Bunun sebebi sertleştirmeden sonra malzemenin içinde ostenitten ve martenzite dönüşümden kaynaklanan kalıntı gerilmelerin varlığıdır. Tel erozyon da işlenmiş malzemenin ısıl işleminde menevişle menin yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreler yapılması gerekir. Bu tezgâhların işleme ve sarf malzemelerinin maliyetinin yüksek olması ayrıca işlem zamanının uzunluğu en önemli dezavantajlarıdır. Malzeme içyapısında meydana getirdiği sertlik değişimleri ve kalın malzemelerde yüzey düzgünlüğü ve ölçü tamlığı elde etmek için işlem sayısının artırılması gerekmesi ve ilk yatırım maliyetinin çok yüksek olması bu kesim yönteminin olumsuzlukları arasında sıralanabilir.

Tel erozyonda akım şiddeti arttıkça kesme hızı da artar fakat belli bir artıştan sonra telin kırılması veya kopması iş parçasının hassasiyetini olumsuz etkilemektedir. Kesme alanı büyüdükçe malzemenin sertliği ve telin talaş kaldırma hızı düşmektedir. Birim alanına gelen kıvılcım enerjisi miktarı düştükçe malzemenin sertliği ve talaş kaldırma hızı düşmektedir. Bu yüzden tel erozyonda kesme işini programlarken bu tarz olumsuzlukları hesaba katmak gerekir.

Yüzey pürüzlülüğü bakımından diğer kesme yöntemlerine göre avantajlı görünse bile lazerle kesme işlemlerinde malzeme kalınlığının artmasında hem sarf malzemesi hem de işçilik maliyeti son derece yüksek sayılabilecek seviyeye çıkmaktadır. Bu durum imalat sektörü için tercih edilebilirliğin ikinci plana atılmasına sebep olmakta ve alternatif yöntem olan AWJ ile kesme tercih nedeni haline gelmektedir. (Çizelge 4.1, 4.2)

Çizelge 4.1 Farklı kesme yöntemlerine bağlı olarak kesme hızlarının karşılaştırılması

Tezgah	Su Jeti	Plazma	Lazer	Tel Erozyon
İlerleme Hızı (mm/dk)	5000	1500	600	120

Çizelge 4.2 İleri kesme tekniklerinde kullanılan tezgahların ilk yatırım maliyetleri

Tezgah	Su Jeti (QMAX KMT SL-V)	Plazma (VESKA 1500x)	Lazer (BYSTRONIC- By 3015)	Tel Erozyon (SODICK AQ 535)
İlk Yatırım Maliyeti (\$)	100.000-150.000	30.000-100.000	250.000-450.000	200.000-400.000

4.2.1 Farklı Kesme Yöntemlerinin Malzemelerin Metalürjik Yapısı Üzerindeki Etkileri

Farklı kesme yöntemlerinin, malzemenin metalürjik özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için, incelenen malzemelerin kesilmesinden önce alınan orijinal malzemeye ait mikro yapı fotoğrafları Resim 4.1’de görülmektedir.

Bu mikro yapı fotoğraflarının incelenmesi ile, farklı yöntemlerle kesilen malzemelerin, kesilen yüzeylerinde ve bu yüzeye yakın bölgelerde mikro yapı özellikleri değerlendirilmiş ve farklı kesme yöntemlerinin malzemenin metalürjik özellikleri ve sertlik değişimleri üzerindeki etkileri orijinal mikro yapılarla karşılaştırılarak Çizelge 4.3’de, bir tablo halinde özetlenmiştir.

Bu karşılaştırmalar sonucu meydana gelen değişiklikler deneyde elde edilen en önemli sonuçları vermiştir. Çizelgede gösterildiği gibi kullanılan kesme yöntemlerinden sadece su jeti ile kesmede malzeme yüzeyinde içyapısında ve kesme kenarında kayda değer bir değişim olmamıştır.

Çizelge 4.3 Farklı kesme yöntemlerinin kesilen malzemenin kesme kenarındaki metalurjik yapısına etkilerinin değerlendirilmesi

KESME YÖNTEMİ	St 37	St 50	Hardox 500
KESİLMEMİŞ MALZEME	İşlenmemiş şekilde malzemenin iç yapısı gevşek ve düşük sertlikte Alaşım elementi oranları düşük.	Malzemenin iç yapısında sertlik değeri orta düzeyde metalurjik özellikleri bakımından darbe dayanımı yüksek .	Yüksek sertlik ve mukavemete sahip darbe ve burulma dayanımı yüksek metalurjik özellikleri bakımından
PLAZMA KESİM	Aşırı ısınmadan dolayı kesme bölgesinde yapısal bozulmalar olmuş ve parçanın iç yapısında çok sert bir doku meydana gelmiş.	Aşırı ısınmadan dolayı kesme bölgesinde yapısal bozulmalar olmuş ve parçanın iç yapısında çok sert bir doku meydana gelmiş.	Malzemenin ergime sıcaklığına yakın kesim olması nedeniyle metalurjik yapı bozulmuş aşırı gerilme meydana gelmiş.
LAZER KESİM	Kesme kenarında aşırı ısınmadan dolayı yapısal bozulma meydana gelmiş İğneli doku oluşmuş sertliği artmış.	Kesme kenarında aşırı ısınmadan dolayı yapısal bozulma meydana gelmiş karbon kaybı olmuş.	Kesme kenarında yapısal bozukluklar var sertlikte içe doğru azalma var.
TEL EROZYON KESİM	Kesme bölgesinde ısınma ve soğumadan kaynaklanan yapısal bozukluk var.Sertliği kısmen artmış.	Kesme kenarında ısıdan kaynaklanan yapısal bozulmalar olmuş. Sertlik artmış.	Kesme kenarında ısıdan kaynaklanan yapısal bozulmalar olmuş. Sertlik artmış.
AŞINDIRICILI SU JETİ KESİM	Kesme bölgesinde ısı ve deformasyona dayalı bir değişiklik olmamış. Sertlik değişmemiş.	Kesme bölgesinde yapısal değişiklik yok. Sertlik değişimi yok.	Kesme bölgesinde ısıya bağlı değişim yok, sertlik değerleri belirgin oranda değişmemiş.

4.2.2 Farklı Kesme Yöntemleri İle Kesilen Numunelerde Sertlik Değişimleri

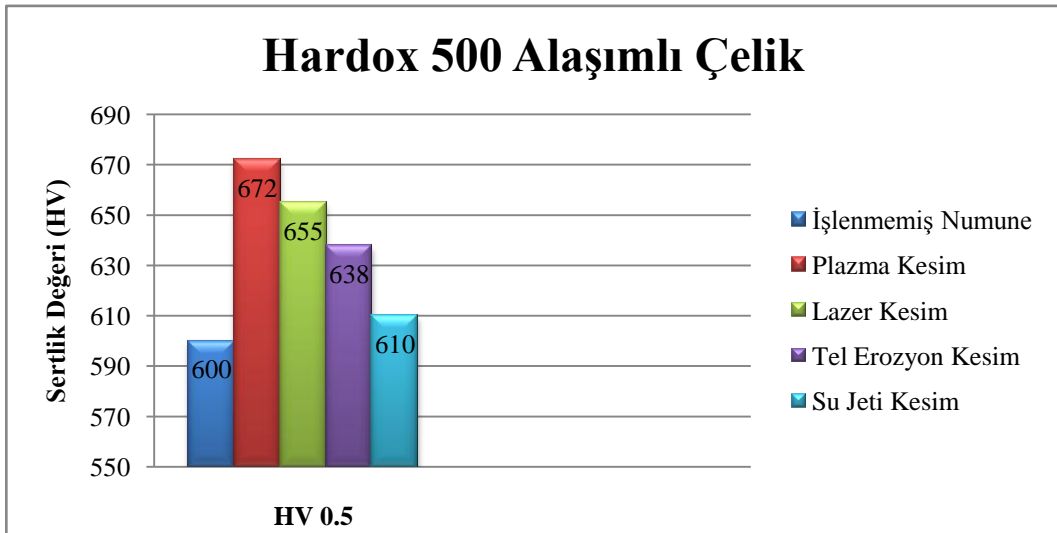
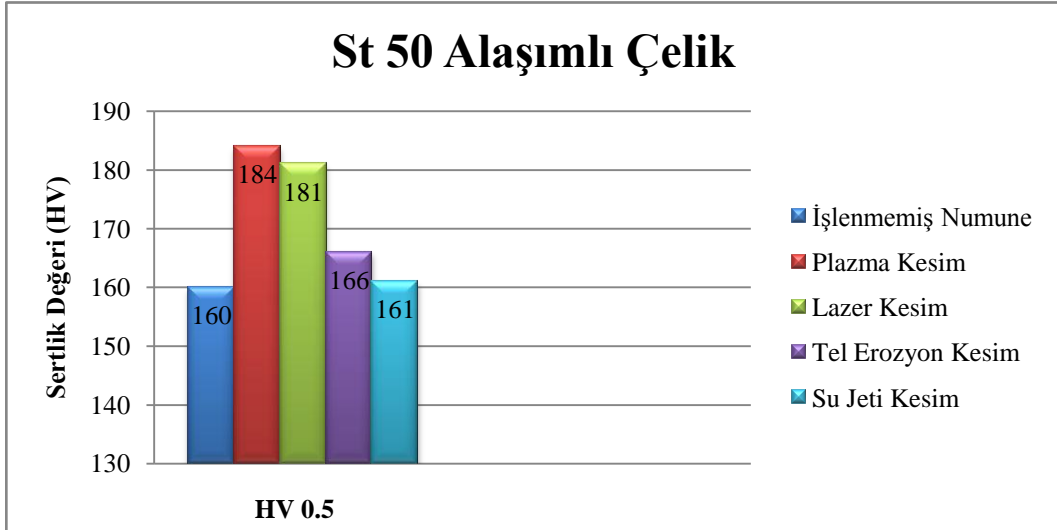
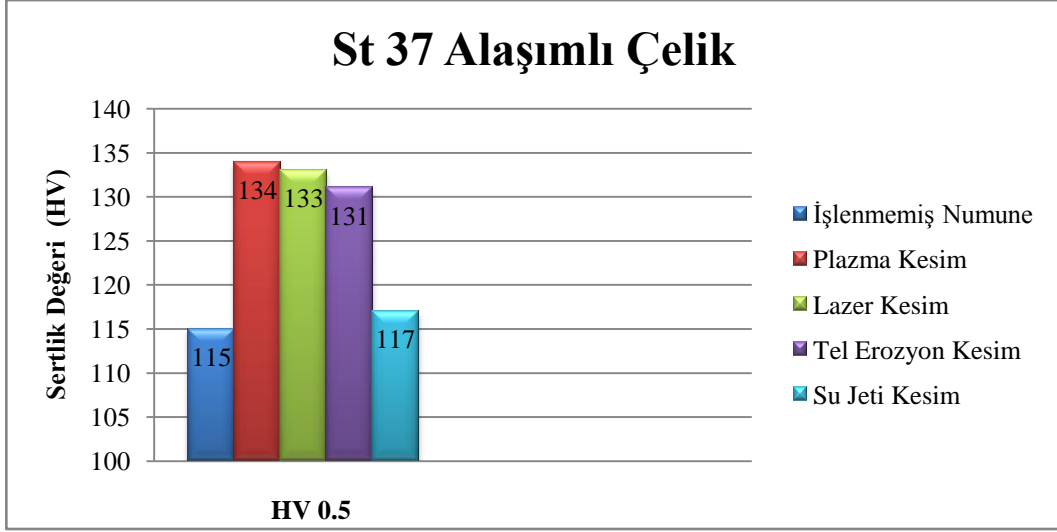
Farklı kesme yöntemlerinin özelliklerine bağlı olarak, öncelikli olarak malzemenin kesme yüzey ve kenarına yakın bölgelerde metalürjik yapısında değişimler meydana geldiği gözlenmiştir. Malzemelerde kesim yöntemlerine bağlı olarak diğer özelliklerin değişmesi de söz konusudur. Kesilen malzemelerde meydana gelen bu değişiklikleri tespit etmek için, öncelikli olarak kesme işlemine tabi tutulmamış numunelerin orijinal sertlikleri tespit edilmiştir. Kesme işlemlerinden sonraki değişikliklerin tespiti ve karşılaştırmanın yapılabilmesi için, kesme kenarlarından itibaren merkeze doğru komşu yüzey üzerinde 2, 4, 6 mm mesafelerde vickers (HV) cinsinden sertlik değerleri ölçülmüştür.

Farklı kesme yöntemlerine tabi tutulan malzemelerin kesilen yüzeylerindeki sertlik değerlerinin malzemenin iç kısmına doğru nasıl bir değişim gösterdiğini anlamak, işlem öncesi ve sonrası karşılaştırmayı yapabilmek için oluşturulan grafikler, St 37, St 50 ve Hardox 500 için Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’de verilmiştir.

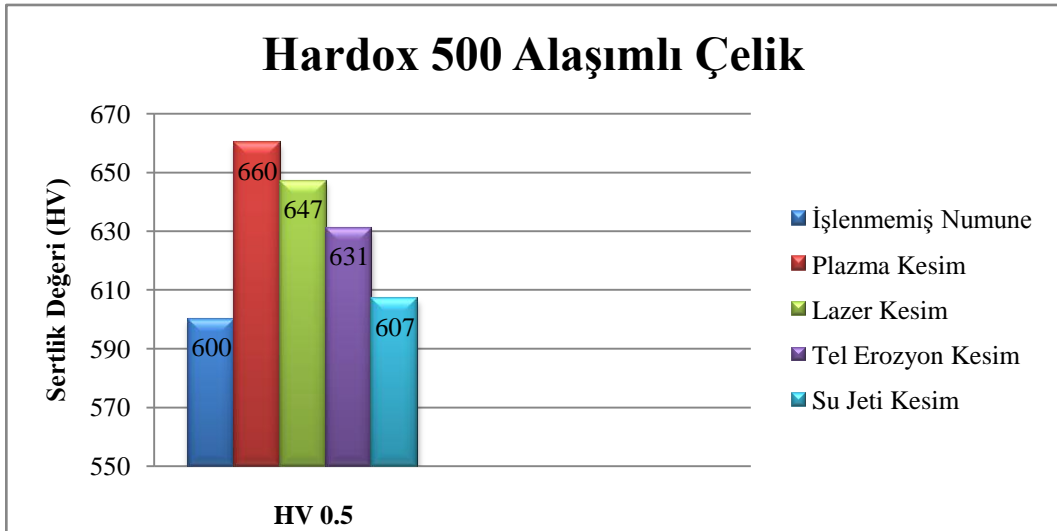
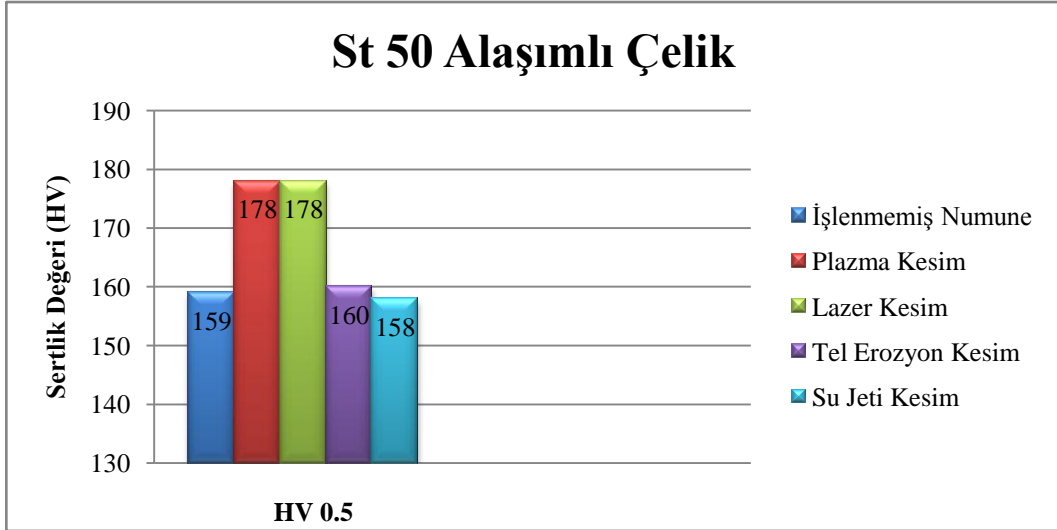
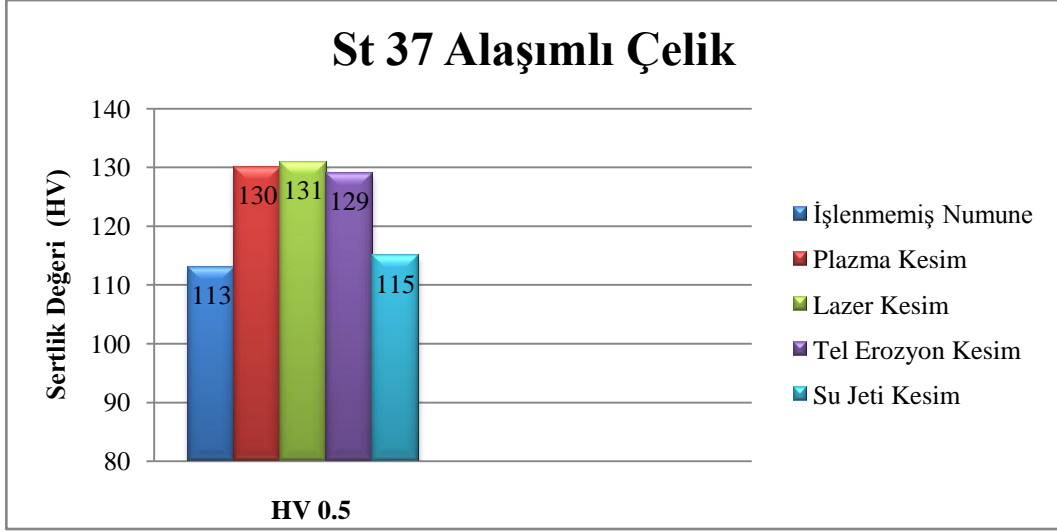
Bu grafikler incelendiğinde, farklı kesme yöntemlerinde malzeme iç yapısına bağlı olarak sertlik değerlerinin değiştiği görülmektedir. Bu değişimin en fazla olduğu kesim yönteminin plazma, en az olduğu kesim yönteminin ise su jeti ile kesme olduğu açıkça fark edilmektedir.

Farklı malzemelerde farklı sertlik değerlerine bakarak su jeti ile kesmenin en üst düzeyde avantaj sağlayıp malzemelerde iç deformasyona neden olmadan işlemin tamamlandığı görülmüştür. Diğer kesme yöntemlerinde tel erozyon, lazer ve plazma kesimler su jetinin avantaj yönünden sıralamasını takip etmektedir.

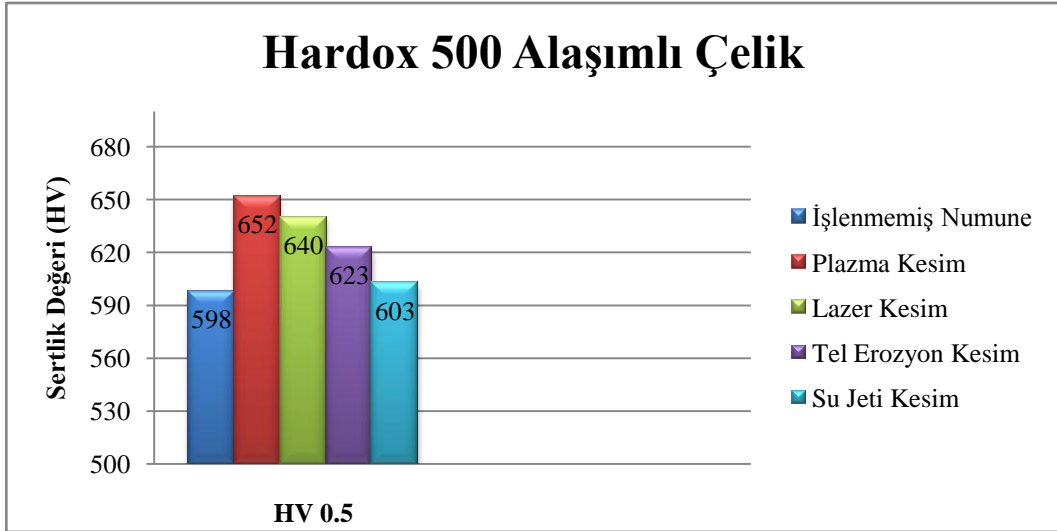
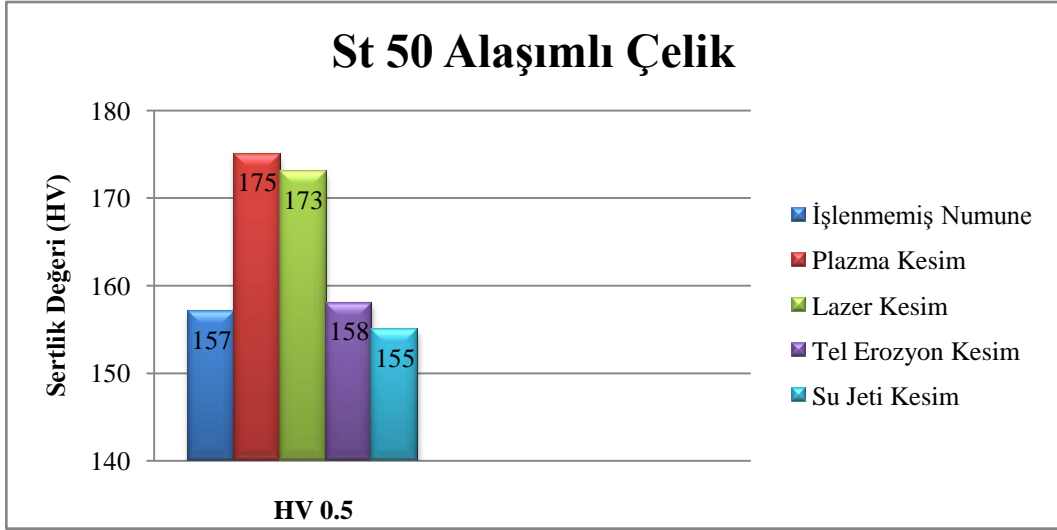
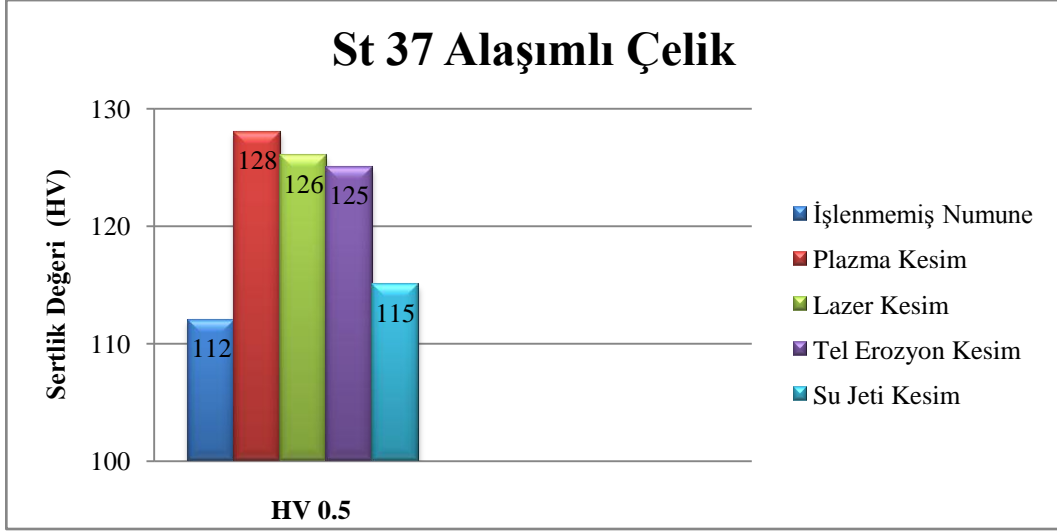
Bu ölçümlerin sonuçları, St 37, St 50 ve Hardox 500 için Şekil 4.4’deki grafiklerde gösterilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde ortaya çıkan önemli sonuç, bütün malzemelerde AWJ ile kesme yöntemi için doğrusal bir eğilimin olması ve dolayısıyla bu yöntemle kesilen malzemelerde ısıdan etkilenmiş bir bölgenin olmamasıdır.



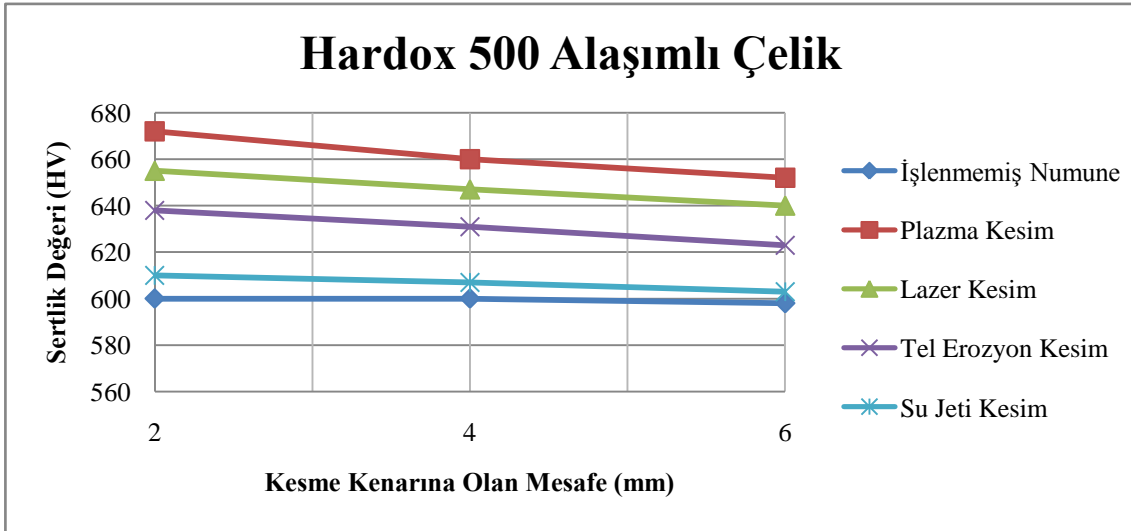
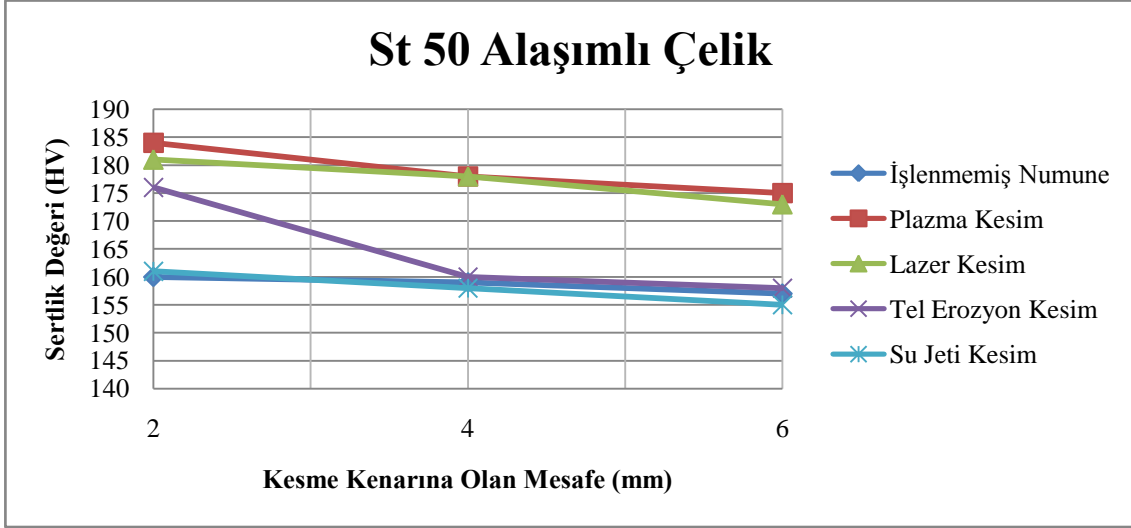
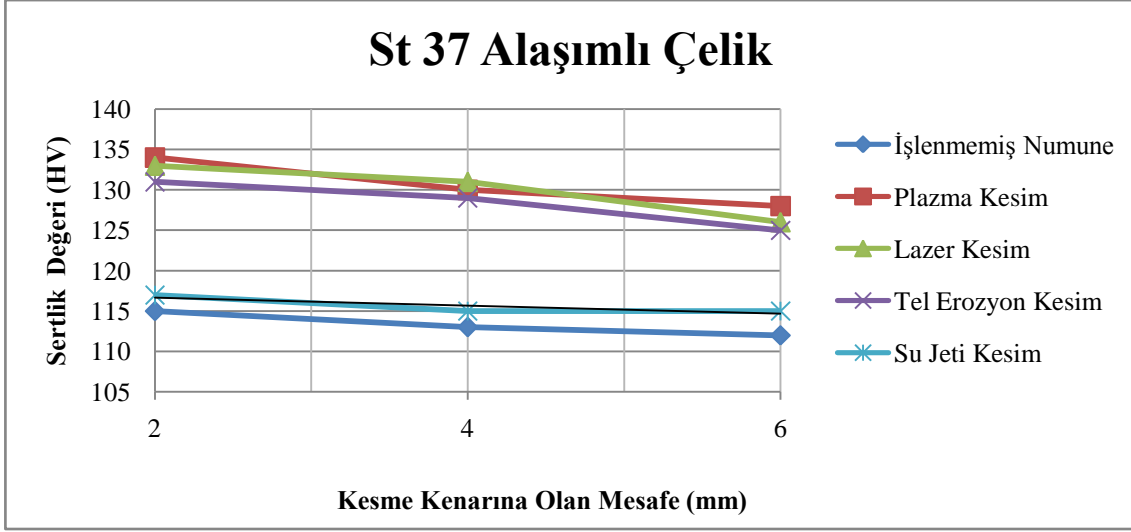
Şekil 4.1 Kesme Kenarından 2 mm Mesafede Sertlik Değerleri



Şekil 4.2 Kesme Kenarından 4 mm Mesafede Sertlik Değerleri



Şekil 4.3 Kesme Kenarından 6 mm Mesafede Sertlik Değeri



Şekil 4.4 HV 0.5 lik Sertlik Ölçüm Grafikler

AWJ ile kesme yöntemi, malzemenin metalurjik ve sertlik özelliklerinde hiçbir değişime sebep olmadan kesme yapabilen bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır.

Metalurjik özelliklerde ve sertlikte değişimin en fazla olduğu yöntemin ise "Plazma kesme" yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntemde sertliğin yüzeyden çekirdeğe önemli ölçüde değiştiği, malzemenin tamamına yakın kısmının ısıdan etkilendiği söylenebilir.

AWJ ile kesme yönteminin en büyük rakibi olarak gösterilen lazer ve plazma ile kesme yöntemlerinde de kesme yüzeyinden merkeze doğru sertlikteki sürekli değişim, ısıdan etkilenen bölgenin çok geniş olduğunu göstermektedir.

Kesmede uygulanan bütün yöntemler incelendiğinde, malzeme içyapısında derinliğe bağlı olarak yapısal değişiklikler olduğu görülmektedir. Bu durum, malzemelerin kesilmesinde metalurjik yapının değişmesine neden olacak kadar ısı meydana geldiğini göstermektedir. Kesme esnasında malzemeler ergime sıcaklığına yakın bir ısıl işleminden geçtikleri için aşındırıcı su jeti ile kesmede elde edilen sonuca bu yöntemlerle ulaşamamaktadır.

Kesme yöntemi olarak kullanılan metotlardan, tel erozyon ile kesmede elde edilen sertlik değerlerinin lazer ve plazma yöntemlerindeki göre biraz daha iyi olması, bu yöntemlerin koruyucu sıvı içerisinde gerçekleştirilmesi ve böylece sıcaklığın nispeten kontrol edilmesine bağlı olarak açıklanabilir.

Uygulanan kesme yöntemleri içerisinde; metalurjik özellikler ve sertlikteki değişim açısından orijinal malzeme yapısı ve sertliği ile bir kıyaslama yapıldığında, en iyi sonuçların aşındırıcı su jeti ile kesme yönteminde elde edildiği görülmektedir. Aşındırıcı su jeti ile kesilen yüzeylerin sertliği, hemen hemen orijinal malzeme sertliğine (Her malzeme için) çok yakın değerlerde seyretmektedir. Bu durum, bu yöntemde etkili olan aşınma mekanizmalarına bağlı olarak açıklanabilir.

Bölüm 2'de literatürdeki çalışmaları esas alarak yapılan kapsamlı değerlendirme, Aşındırıcı su jeti ile kesmede sıcaklık değişiminin çok sınırlı düzeyde ($\Delta t=75$ °C civarında) kaldığını göstermektedir. Bu durum, aşındırıcı su jeti ile kesme yönteminde ısıdan etkilenmiş bir bölge olmamasını açıklamaktadır. Bu özellik dikkate alındığında,

aşındırıcılı su jeti ile kesme yöntemi, malzemenin orijinal yapısında, mekanik ve metalurjik özelliklerinde değişime neden olmayan etkili bir yöntem olarak kabul edilme ölçüsünde bulunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada kullanılan malzemeler üzerinde, farklı yöntemlerin kesilen yüzeylerdeki sertlik değişimlerini hangi oranda etkilediği (% olarak) Çizelge 4.4'de, bir arada gösterilmiştir. AWJ ile kesme yönteminden sonra sertlikte en az değişim tel erozyon ile kesme yöntemlerinde elde edildiği görülmektedir. Bu durum, diğer yöntemlerde kesme parametrelerinin, yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkacak şekilde seçilmiş olmasına dayandırılabilir.

Kesme yönteminin özelliklerine bağlı olarak, ısıdan etkilenen bölgenin, kesilen yüzeyden itibaren derinliği de değişmektedir. Yöntemin sebep olduğu metalurjik yapıdaki değişime bağlı olarak, kesme yüzeyinden itibaren numunelerin merkezine doğru 2 mm aralıklarla yapılan sertlik ölçümleri, ısıdan etkilenen bölgenin genişliği hakkında yeteri kadar açıklayıcı bilgi vermektedir.

Mikro fotoğraf ve grafiklerden elde edilen bu görüntü, her yöntemin malzemenin metalurjik özelliklerindeki etkilerine bağlı olarak sertlikte de bir değişime neden olduğunu doğrulamaktadır.

Klasik olmayan (Plazma, lazer, tel erozyon) yöntemlerde kesme talaş kaldırma için harcanan enerjinin tamamına yakın kısmının "ısı" olarak açığa çıktığı sadece çok az bir kısmının elâstik kayıp olarak, kayıp enerjiye dönüştüğü bilinmektedir. Isıya dönüşen bu enerji ile ortaya çıkan sıcaklık, kontrol edilemediği takdirde iş parçası malzemesinin metalurjik özelliklerinde değişime sebep olacaktır. Bu sıcaklığın, malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkması, metalurjik özelliklerinin önemli ölçüde değişmesinin temel sebebidir. Harcanan enerjinin ısıya dönüşmesi ve soğutma şartları malzemenin metalurjik değişim ve dolayısıyla da sertlik gibi mekanik özelliklerdeki değişimin temel sebebi olarak yorumlanabilir.

Çizelge 4.4 Kesilen malzemelerin orijinal sertlik değerlerine bağlı olarak, farklı yöntemlerle kesilen yüzeylerdeki % sertlik değişimleri

KESME YÖNTEMİ	MALZEMELER					
	St 37		St 50		Hardox 500	
	SERTLİK (HV)	%Değişim	SERTLİK (HV)	%Değişim	SERTLİK (HV)	%Değişim
ÇEKİRDEK	120	-	160	-	600	-
SU JETİ	119	0,83	159	0,64	602	0,33
TEL EREZYON	131	9,16	166	3,75	638	6,34
LAZER	133	10,84	181	13,13	655	9,16
PLAZMA	134	11,76	184	15,12	672	12,10

Plazma ile kesme yöntemlerinde kesme işleminin temeli doğrudan malzemenin erime sıcaklığına kadar çıkılması suretiyle malzemenin kesilmesi esasına dayanmaktadır. Malzemenin bu sıcaklıklara kadar çıkması ve sonrasındaki soğutma şartları malzemenin metalurjik ve mekanik özelliklerinde ciddi değişimlere sebep olacaktır. Bu çalışmada da, hem metalurjik özellikler hem de sertlik açısından en büyük değişimlerin bu kesme yönteminde görülmesi, beklenen bir sonuçtur.

Geleneksel olmayan yöntemler ele alındığında, metalurjik değişimlerin ve sertlik değişiminin sebebi, yöntemlerin esasına dayanmaktadır. Plazma, Lazer ve Tel erozyon yöntemlerinin temeli de, malzemenin ergime sıcaklığına kadar varan sıcaklıklarda malzemenin kesilmesi esasına dayanmaktadır. Uygulanan enerjinin ve soğuma şartlarının farklı olması, bu kesme yöntemlerinde elde edilen farklı metalurjik özelliklerin ve sertliklerin en temel kaynağıdır.

Bu nedenle malzemelerde uygulanan kesim yöntemlerinin malzeme iç yapısına zarar verip sertliğinde değişme meydana getirmemesi için en soğuk yöntemle kesilmesi tercih edilmelidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Günümüzde birçok dünya ülkesinde her üretim alanında yoğun olarak kullanılan ve ileri bir teknoloji ürünü olan aşındırıcılı su jeti ile kesme yönteminin detaylı olarak incelenmesini ve diğer kesme yöntemlerine göre üstünlüklerini ön plana çıkarmayı amaçlayan bu araştırmada, özellikle makine imalat sektöründe yaygın olarak kullanılan endüstriyel mühendislik malzemelerinden geniş bir malzeme grubu, farklı malzeme kalınlıkları ve sertlikleri üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Deneyde kullanılan farklı fiziksel ve mekanik özellikler ile değişik kullanım alanlarına sahip malzemelerin, denenilen farklı kalınlık ve sertliklerin tamamında benzer değişim özellikler elde edilmiştir.
- Aşındırıcılı su jeti kesme yöntemiyle kesilen yüzeylerde, jet huzmesinin temas ettiği bölgede herhangi bir ısı işlem meydana gelmediği için malzemelerde kesmeye bağlı olarak herhangi bir iç yapı değişikliği ve sertlik farklılıkları meydana gelmemiştir.
- Farklı kalınlık ve sertlik değerlerinde seçilen malzemelerin kesilmesinde su jeti huzmesinin malzemeye iç yapı olarak etkilemesine bir katkısı olmadığı yüzeyde meydana gelen soğuk kesme işleminde ekstra bir soğutmaya gerek kalmadığı için belli kalınlığa kadar çıkış deformasyonu olmadığı görülmüştür.
- Malzeme kalınlıklarının ve yapılarının farklı olması kesme yöntemlerinden etkilenme düzeylerini de belirlemiştir. Sert malzemelerde su jeti kesim yöntemi dışındaki kesme şekillerinde yumuşak malzemede (St37) çok fazla iç yapı değişimine ve gerilmelere neden olduğu parçanın çok yüksek oranda metalurjik özelliklerinin değiştiği görülmüştür. Sert olan Malzemelerde ise (Hardox 500) kesme yöntemlerinin iç gerilmeleri artırdığı ve kesme kenarına yakın bölgelerde sertlik değişiminin çok yüksek olduğu gözlenmiştir.
- Klasik işleme yöntemleri ile işlemede, işlenmesi zor malzemeler grubunda yer alan ve olumsuz işlenebilirlik özellikleri sergileyen Hardox 500 Çelik, bu çalışmada AWJ

ile kesilen malzemeler arasında da bu özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Çok sert malzemelerin kesilmesinde dahi iç yapı değişimi söz konusu olmamaktadır.

- Bütün kesme yöntemlerinde süre esasına dayalı kesim yapıldığı için su jeti ile yapılan kesimin kısa zamanda gerçekleşmesi diğer yöntemlerden üstün olan başka bir yönünü tercih sebebi haline getirmiştir.
- Aşındırıcılı su jeti kesme işleminde kesilen malzeme kalınlık sınırı mukayeseye gerek kalmayacak kadar üst bölgelerdedir.
- Su jeti ile kesim makinelerinin ilk yatırım ve sarf malzemeleri maliyetinin düşük olması ve sarf malzemelerinin geri dönüşümlü kullanılması ekonomik olarak ileri düzeyde tercih edilmesine sebep olmuştur.
- Farklı kesme yöntemlerinin, kesilen yüzeyin metalurjik özellikleri üzerindeki etkisi dikkate alındığında, en olumlu sonuçların elde edildiği AWJ ile kesme yönteminin ön plana çıktığı görülmektedir.
- Farklı kesme yöntemlerinin uygulanması sırasında oluşan farklı ısı ve soğuma etkileri, incelenen malzemelerin metalurjik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahipken AWJ ile kesmede, ısının çok yüksek olmaması sebebi ile kesilen yüzeylerde ısıdan etkilenmiş bir bölge oluşmamakta ve malzemenin orijinal yapısında bir bozulma meydana gelmemektedir. Bu durum metalürji özelliklere bağlı olarak mekanik özelliklerinde de bir değişim olamayacağı anlamı taşımaktadır.
- Kesilen malzemenin mikro yapısındaki değişimlere bağlı olarak, ısıdan etkilenmiş bölge ve bu bölgenin genişliği dikkate alınacak olursa, bazı metotlarda yüksek ısı ve ani soğumalar, meydana gelen yapısal değişim önemli olmaktadır. Kesme metodunun özelliklerine bağlı olarak, bazı yöntemlerde kaba taneli yapı, bazı yöntemlerde ise ani soğumaya bağlı olarak ince taneli yapı göze çarpmaktadır. Yine yöntemin özelliklerine bağlı olarak yapıda gaz boşlukları ve mikro çatlak oluşma eğilimi görülmektedir. AWJ ile kesme dışındaki yöntemlerde yüksek ısı oluşması ve ani soğumaların meydana gelmesi kesilen bölgede mikro yapının bozulmasındaki sebep olmaktadır.

- Deney sonucunda incelenen dört farklı yöntem arasında, ısıdan etkilenmiş bölgedeki mikro yapıdaki değişimler dikkate alınarak bir değerlendirme yapılacak olursa, en olumsuz yöntemin "Plazma ile kesme" en olumlu yöntemin ise "AWJ ile kesme" olduğu görülmektedir.
- Farklı yöntemlerin, kesme sonrası malzemenin metalurjik özellikler üzerindeki etkisine bağlı olarak malzemenin mekanik özellikleri de değişmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucu, farklı yöntemlerle kesilen yüzeylerde ölçülen sertlik değerlerinin, malzemelerin orijinal değerlerinden çok farklı olması, bu durumu doğrulamaktadır.
- Su jeti dışında uygulanan bütün kesme yöntemleri ısı işlem içerikli oldukları için, malzemenin sertliğinde belirgin bir değişime sebep olmaktadır. Kesme yöntemlerinin özelliklerine bağlı olarak sertlik değişimleri de farklı olmaktadır. Bu farklılık, kesme sırasında oluşan ısı ve sıcaklık ile soğutma şartlarına bağlı olarak değişmektedir.

5.2 Öneriler

İleri teknoloji ürünü ve bir çok dünya ülkesinde kullanılan alternatif bir işleme metodu olarak endüstriyel uygulamalarda kendine önemli derecede yer bulan AWJ ile işleme yönteminin, farklı mühendislik malzemelerinin kesilmesindeki etkinliğini ve avantajlarını irdelemeyi amaçlayan bu çalışma, ülkemizde çok fazla tanınmayan ve diğer kesme yöntemlerinden daha üstün özelliklere ve düşük ilk yatırım maliyetine sahip olmasına rağmen imalat sektöründe tercihinin yavaş kalmasına sebebiyet verecek bir gerekçenin olmadığını ispatlamanın amacını gütmeye çalışmaktadır.

Araştırmanın esasını oluşturan deneysel çalışmalar, akademik kurumlarda böyle bir kesim tezgahının mevcut olmaması sebebi ile, üç farklı il ve beş farklı firmada yapılmıştır. Çalışmaların yapıldığı firmaların ticari beklentileri ve makinelerinden yüksek verimlilik elde etme amaçları, deneysel çalışmalarda, daha detaylı ve değişik bulguların elde edilmesini sınırlamıştır.

Gelişmiş ülkelerde çok önceden beri kullanılan bu avantajlı kesim makinelerinin kullanımının ülkemizde yeni çoğalmaya başlaması, bu alanda literatürde pek çok akademik araştırmanın yapılmış ve yapılıyor olması, konunun güncelliğini göstermektedir. Yöntemin karmaşıklığı ve işleme parametrelerinin sayısının çok fazla olması, yapılan pek çok çalışmaya rağmen, yöntemin henüz tam olarak anlaşılmasının temel sebebidir. Bu eksiklikleri gidermeye yönelik deneysel çalışma gelecek araştırmalara ışık tutması amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Klasik işleme yöntemlerinde işleme parametreleri çok sınırlı sayıda iken, AWJ ile işleme yönteminde Bölüm 6'da anlatıldığı gibi işleme parametrelerinin sayısı oldukça fazladır. Aynı şekilde, endüstriyel malzemelerdeki sürekli gelişme, yöntemin bu malzemeler için uygulanabilirliğinin araştırılmasını da gerektirmektedir.

Bu deneysel çalışmada, özellikle kesme yöntemlerinin malzeme iç yapısına etkileri baz alınmış, diğer işleme parametreleri sabit tutulmuştur. Araştırmayı genişletmek amacı ile;

- Özellikle basınç, aşındırıcı tipi, nozul çapı jet çarpma açısı etkili parametreler ve bu parametrelerin kombinasyonları ile bu çalışmadan elde edilen veriler genişletilebilir.
- İmalat sektöründe yaygın kullanım alanına sahip seçilen üç farklı kimyasal özelliğe sahip malzemenin sayısı ve kesme yöntemleri artırılabilir.
- Deneyde kullanılmak üzere seçilen üç farklı kalınlık grubuna ilaveten, AWJ'nin daha kalın ve değişik malzemelerde kullanılabilirliğini ve etkinliğini değerlendirmek için malzeme kalınlıkları ve çeşitliliği artırılabilir.

Bu çalışmada AWJ'nin farklı kesme yöntemleri ile karşılaştırılması için, kesme yönteminin kesilen yüzeylerin metalurjik özellikleri ve sertliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın bu boyutta geliştirilmesi için;

- Kullanılan kesme yöntemlerinin sayısı artırılabilir,

- Kullanılan malzemelerin çeşitliliği artırılabilir,
- AWJ'nin diğer kesme yöntemlerine göre üstünlükleri artırılabilir,
- AWJ'ye alternatif yöntemlerin, yüzey özellikleri ve kesit genişliği gibi parametreler üzerindeki etkileri maliyet hesabı yapılarak değerlendirilebilir,
- Literatürdeki çalışmalara paralel olarak, farklı yöntemlerin, AWJ ile ekonomik açıdan diğer yöntemlerden üstünlüğünü karşılaştırmayı amaçlayan çalışmalar yapılabilir.
- Deneysel yöntemin kesme dışında kullanıldığı ve AWJ ile ileri işleme yöntemleri olarak adlandırılan, geleneksel işleme yöntemlerine alternatif olarak imalat sektöründe frezeleme, tornalama ve delme yöntemlerindeki etkinliği ve ekonomikliği, araştırılabilir.
- Su jeti ile kesmede, farklı özellik ve sertliklerdeki malzemeler üst üste konularak kesme parametreleri ve yüzeyleri hakkında detaylı araştırma yapılarak diğer işleme yöntemlerinde meydana gelen tezgah ve takım ayarı zaman kayıplarının minimum olduğu konusunda detaylı bir araştırma yapılabilir.
- Yüzey kalitesinin yüksek olduğu tel erozyonla kesme yönteminin ileri aşamalarda malzeme kalınlığı kısıtı ve ilk yatırım maliyetinin yüksekliği bakımından su jeti ile kesme yöntemine göre dezavantajlı durumda olduğu maliyet hesaplamaları yapılarak ekonomiklik yönünden araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akkurt, A., Şeker, U., Ercan, F., 2002, "Aşındırıcılı su jeti (AWJ) ile işlemede enerji kaybı olayının deneysel tahmini, karakterizasyonu ve modellenmesi-yapılan çalışmaların değerlendirilmesi", Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Journal of Polytechnic, Cilt 5, Sayı 2, pp 137-147, ISSN 1302-0900 Haziran 2002, Ankara, Türkiye
- Akkurt, A., Şeker, U., Ercan, F., 2002, "Aşındırıcılı su jetiyle (AWJ) kesmede elde edilen yüzey özellikleri - yapılan çalışmaların değerlendirilmesi", Yayınlanmak üzere sunuldu
- Ansorge, A., 1988, "Fluid jet principles and applications", Proceedings, Conference of Nontraditional Machining.
- Babu M. K.; Chetty O. V. K., 2003, A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Waterjet Machining, Wear, in press.
- Etchells P. 1997, Cutting Head Design Powers Abrasive Waterjet Cutting Costs, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Volume 69, No 2, pp 147-150.
- Hashish M., "Pressure Effects in Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining", Transactions ASME Journal of Engineering Materials and Technology, 111(7), 221-228, 1989.
- Hashish, M., 1984, "Cutting with abrasive waterjets", The Carbide and Tool Journal.
- Hashish, M., 1987, "Prediction of depth of cut in abrasive waterjet (AWJ) machining", Modeling of Materials Processing, Ed. AA Tseng; ASME, MD, vd. 3
- Hashish, M., 1989, Abrasive-waterjet machining, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111. pp 154-162 , U.S.A
- Hashish, M., 1991, "Abrasive jets", Fluid Jet Technology - Fundamentals and Applications, ISBN 1-880342-01^, Publ. by the VVJTA, USA
- Hashish, M., 1992, "On the modeling of surface waviness produced by abrasive-waterjets", Proceedings of the 11 th International Conference on Jet Cutting Technology, St. Andrews, pp 17-34, ScotJand.
- Hashish, M., 1993, "Prediction models for AWJ machining operations", American Water Jet Conference, pp. 205-216, Seattle, USA,.
- Hunziker, W., 1990, Water-jet cutting, Bqstroic Lazer AG. CH-3362 Niederönz Svvtizerlend.
- Josef, R.V., 1996, The fascinating world of sheet metal, TRUMPF GmbH + Co. KG,

- Külekçi M. K., 2002, Processes and Apparatus Developments in Industrial Waterjet Applications, International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol 44, September 2002, pp 1297-1306.
- Labus, T. J., 1991, "High pressure equipment and systems", Fluid Jet Technology-Fundamentals and Applications, ISBN 1-880342-01-4, Publ., By the VVJTA, USA
- Miranda, R.M., Lousa, P., 1993, "Abrasive waterjet cutting of portuguese marbles". In: Hashish M (ed) 1993 proc.7th Amer water jet conf, vol. 1, VWater Jet Techn. Ass., st. Louis, pp 443-457
- Momber A.W., "Principles of Abrasive Water Jet Machining", NewYork, Springer-Verlag, 1998.
- Nakamura, H., Nazaraki, T., Yanagihara, S.,1989, " Cutting technique and system for biological shield" Nuclear Technol. 86:168-178
- Powell, J., Ohlsson L., Olofsson E. M., 1995, " Optimisation of the piercing or drilling mechanism of
- Summers, D. A., 1991,"Historical perspective of fluid jet technology", Fluid Jet Technology - Fundamentals and applications, ISBN 1-880342-01-4, Publ by the VVJTA, St Louis, MO, USA.
- Trumpf, 1997, Technical Information: Water Jet Cutting , Technical Documentation Department of Trumpf GmbH+Co., 50p.
- Wang J., Guo D. M., 2003, The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics, Journal of Material Processing Technology, Vol. 133, pp 371-377.
- Zaring, K., "Procedure optimization and hardware improvements in abrasive waterjet cutting systems", 6th American Waterjet Conference pp 237-248, USA

6.1 İnternet Kaynakları

Erişim Tarihi

İnt. Kyn. 1 (Ingersoll-Rand Firmasının resmi internet sitesinden değiştirilerek alınmıştır)	10.09.2007
İnt. Kyn. 2 (Omax firmasının resmi internet sitesinden alınmıştır)	07.11.2007
İnt. Kyn. 3 (Berkeley Chemistry firması resmi internet sitesi)	02.01.2008

7. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İsmet DAHİL

Doğum Yeri : Zonguldak

Doğum Tarihi: 27.12.1968

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Zonguldak Teknik Lisesi 1987

Lisans : Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi 1994

Yüksek Lisans: Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Arçelik Beyaz Eşya Fabrikası 1994

Afyonkarahisar Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi 1994

Batman-Sason Lisesi 1995

Afyonkarahisar-Şuhut Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi 1999

Afyonkarahisar-Bolvadin Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi 2001

Afyonkarahisar-İscehisar Mesleki Eğitim Merkezi 2003

Yayımları (SCI ve diğer)

Diğer konular