

AŞINDIRICILI SU JETİ (AWJ) İLE İŞLEMEDE ENERJİ KAYBI OLAYININ DENEYSSEL TAHMİNİ, KARAKTERİZASYONU VE MODELLENMESİ – YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Adnan AKKURT* Ulvi ŞEKER** Fevzi ERCAN***

* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü - ANKARA

** Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü - ANKARA

*** Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü - ANKARA

ÖZET

Malzemelerin aşındırıcılı su jetiyle işlenmesinde, enerji kaybı süreçleri önemli bir rol oynar. Bu süreçler, özgül enerji ve çizgisel izler şeklinde oluşan yüzey topoğrafyası gibi ekonomiklik ve kaliteyle ilgili parametreleri etkiler. Aşındırıcılı su jeti ile, farklı işleme şartlarında çeşitli malzemeler üzerinde yapılan deneyler, işleme derinliği ve enerji kaybı arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Bu ilişki, kesme önü geometrisinin parabolik modeline dayanan ikinci dereceden bir eşitlikle, etkin bir biçimde tanımlanabilmektedir. Bu makalenin amacı, aşındırıcılı su jetiyle işlemede enerji kaybı olayının deneysel tahmini, karakterizasyonu ve matematiksel olarak modellenmesine odaklanmış önceki çalışmaların genel bir değerlendirmesini yapmaktır.

Anahtar Kelime: Aşındırıcılı su jeti (AWJ) ile işleme, Enerji kaybı

EXPERIMENTAL ESTIMATION, CHARACTERIZATION AND MODELLING OF ENERGY DISSIPATION PHENOMENON IN ABRASIVE WATER JET CUTTING – A REVIEW OF PREVIOUS STUDIES

ABSTRACT

Energy dissipative processes play a key role in abrasive water jet machining of materials. They influence the economical and qualitative parameters of the process such as specific energy and surface topography with striation marks. Experiments on several materials cut by abrasive water jets under different cutting conditions show that the relation between the depth of cut and the energy dissipation is non-linear. This relation can effectively be described by a second order equation based on the parabolic model of the cutting front geometry. This paper aims to make an evaluation of previous studies focused on experimental estimation, characterization and mathematically modelling of energy dissipation phenomenon in abrasive water jet cutting.

Key Words: Abrasive water jet (AWJ) machining (cutting), Energy dissipation

1. GİRİŞ

Aşındırıcılı su jetiyle işlemede elde edilen yüzey kalitesi, iş parçasındaki kesme derinliğinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. AWJ ile işlenen bir yüzeyin en belirgin özelliği, nispeten daha düzgün yüzey özellikleri sergileyen bir bölgenin altında çizgisel izlerin oluşmasıyla yüzey kalitesinin bozulmasıdır (1). AWJ ile işlemede yüzey karakterizasyonu değerlendiren çalışmalarda, Kim ve arkadaşları (2, 3, 4) bu bölgeyi, “geçiş bölgesi” olarak tanımlamışlardır.

Yüksek enerjili hüzme kullanılan herhangi bir kesme sürecinde olduğu gibi, AWJ ile kesme sürecinde de, yüzey pürüzlüğündeki bu türden değişim, talaş kaldırma işleminin iki aşamada oluşumuna sebep olan talaş kaldırma mekanizmalarının araştırılmasını gerektirmiştir (5, 6).

AWJ ile işleme sürecindeki bu mekanizmalar, genellikle işleme parametrelerine ve kalınlık olarak adlandırılan iş parçası geometrisine bağlıdır. İlk aşamada dar bir açı altında iş parçasına çarpan aşındırıcı tanecikler, nispeten düzgün bir yüzey elde edilmesini sağlamaktadır ve bu aşamadaki mekanizma “kesme-aşınma mekanizması” olarak isimlendirilmektedir. Çizgisel izlerin oluşmasına sebep olan ve kararsız işleme özellikleri sergileyen ikinci bölgede etkili olan mekanizma ise “deformasyon-aşınma mekanizması” olarak isimlendirilmektedir. Bu ikinci nüfuziyet süreci, kesme yüzeyinin (kesiğin) alt tarafındaki çizgisel izlerin temel sebebidir. Bu bölgede talaş kaldırma işlemi, daha geniş bir açı altında etkili olan parçacıklara bağlı erosiv aşınmayla kontrol edilebilir (7).

AWJ de aşındırıcı, su ve havanın karışımı, bir karıştırma haznesinde sağlanmakta ve bu karışımın ivmelendirilmesi, bir ivmelendirme borusu veya awj nozulunda gerçekleşmektedir. Aşındırıcı tanecikler, nozulu saniyede yüzlerce metrelik bir hızla terk etmektedir. Hayli yüksek sayıda aşındırıcı (saniyede 10^5 civarında), işlenen yüzey üzerinde yüksek frekanslı bir çarpmaya sebep olmaktadır (8).

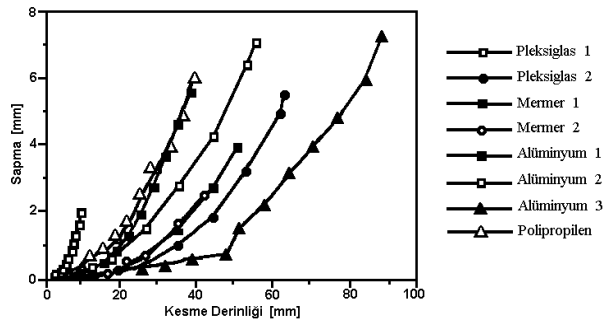
İvmelendirme, nozulunun çapının küçük olması sebebiyle (tipik olarak 0,5 ~ 2mm), aşındırıcı su jeti; bir lazer veya elektron demetine benzer işleme derinliğine bağlı olarak kararsız bir talaş kaldırma yöntemiyle karakterize edilen hüzmeye şeklinde bir takım gibi (akı ile) etki eder (7). Yüksek hızla fotoğraf alma tekniğiyle saydam malzemelerde yapılan deneyler, daha evvel sözü edilen iki farklı talaş kaldırma mekanizması (kesme-aşınma mekanizması / deformasyon-aşınma mekanizması) fikrini gündeme getirmiştir (9, 10). Bu mekanizmalar işlenen yüzeyin üst tarafı ile alt tarafındaki farklı yüzey özelliklerinin açıklanması için kullanılmıştır. Bu yaklaşımdan farklı olarak, Chao ve diğerleri (11); bu çizgisel izlerle oluşan kararsız işleme şartlarının, tezgâh titreşimleri gibi harici faktörlerin bir sonucu olduğunu tartışmışlardır. Ancak bu kavram, işlenmesi güç malzemelerdeki gözlemleri kapsamamaktadır (12). İki farklı talaş kaldırma mekanizması, aynı zamanda Arola ve arkadaşları (13) tarafından da kabul görmemekte ve talaş kaldırma mekanizmasının, verilen bir malzemenin işleme derinliğinden bağımsız olduğunu savunmaktadırlar. Bu araştırmacılar, yüksek hızda çamur şeklindeki akışın, kesilen yüzeyde çizgisel izler oluşturacak şekilde alttan kesme yapan kritik bir kinetik enerjisinin mevcut olduğunu öne sürmüşlerdir. Benzer bir fikir pürüzlük ölçümlerine bağlı olarak Zhou ve arkadaşları (14) tarafından da ortaya konmuştur. Raju ve Rumulu (15), AWJ'nin kinetik enerjisiyle düzgün yüzeyden kaba yüzeye geçiş noktasında (daha evvel ifade edilen "geçiş bölgesi" arasında) bir ilişkinin, gerçekten de mevcut olduğunu göstermişlerdir.

Bu bilgiler ışığında herhangi bir işleme derinliğinde iş parçasındaki enerji dağılımının değerlendirilmesine imkân verecek şekilde, AWJ ile işleme sırasındaki farklı enerji kaybı sürecinin karakterize edilmesi ve büyüklüğünün tartışılması gerekmektedir. Bu araştırmada, bu amaçla yapılan çalışmaların bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. AWJ İLE İŞLEMEDE ENERJİ KAYBI OLAYININ KARAKTERİZASYONU

Hassas işleme uygulamalarında, kabul edilebilir boyut toleransları ve yüzey kalitesinin elde edilmesi için AWJ işleminin kontrol edilebilirliği esastır. Kesme derinliği yönünde kesik (kesilen kanal) genişliğindeki değişim ile kesik yüzeyindeki eğrisel ve çizgisel izler doğrudan doğruya jet hüzmesi enerjisindeki kayıplarla ilişkilidir. AWJ ile işlemin doğasına has bu enerji kaybı olayının tamamen elimine edilememesinden dolayı hassas işleme uygulamalarında AWJ ile işleme sürecini kontrol etmek için bu enerji kaybı mekanizmasının daha iyi anlaşılması esastır.

Zeng, Heines ve Kim (7) yaptıkları çalışmalarda, bu enerji kaybı olayını karakterize etmeyi amaçlayarak, AWJ ile işlenen parçaların kalitesini ve hassasiyetini iyileştirmek için işleme parametrelerini kontrol etmenin mümkün olup olmadığını tartışmışlardır. AWJ kesme veriminin azalmasına bağlı olarak genellikle kesme kafasının ilerleme yönüne zıt yönde çizgisel izler gözlenmektedir. Değişik iş parçalarının işlenmesinde, farklı kesme şartlarına bağlı olmaksızın ortaya çıkan bu izlerin birbirine benzerliği, en ilginç durumlardan biridir. Araştırmacılar bu gözlemi doğrulamak için sünek ve kırılğan malzemeleri temsil eden dört farklı tipte malzeme kullanarak bir dizi işleme deneyini, Çizelge 1'deki işleme parametreleriyle gerçekleştirmişlerdir. Bu malzemelerde elde edilen çizgisel izlerin, iş parçasındaki derinliğe bağlı olarak oluşan sapmaları, Şekil 1'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 1. Çizgisel iz eğrileri (7)

izler, basit bir fonksiyon cinsinden karakterize edilebilmiştir.

Araştırmacılar, talaş kaldırma oranı “M” ile yanal ilerleme “u” ya bağlı olarak, bölgesel kesme

Çizelge 1- Deneylerde kullanılan işleme parametreleri (7)

| Numune Etiketi | Kalınlık (mm) | Su Basıncı (MPa) | Orifis Nozul Boyutları (mm/mm) | Aşındırıcı Tipi ve Elek No | Aşındırıcı Akış Oranı (g/s) | Duruş Mesafesi (mm) | Kesme Hızı (mm/s) |
|----------------|---------------|------------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|
| Pleksiglas1 | 55.35 | 241 | 0.457/1.168 | Barton # 80 | 11.4 | 1.5 | 2.5 |
| Pleksiglas1 | 63.36 | | 0.457/1.168 | IGE Maine Garnet # 60 | 11.4 | | 1.0 |
| Mermer 1 | 51.06 | | 0.457/1.168 | | 11.4 | | 1.0 |
| Mermer 2 | 42.44 | | 0.457/1.168 | | 11.4 | | 1.0 |
| Al 6061-T6 1 | 38.2 | | 0.356/1.168 | | 11.4 | | 1.5 |
| Al 6061-T6 2 | 9.67 | | 0.356/1.168 | Barton Garnet # 80 | 7.6 | | 10.5 |
| Al 6061-T6 3 | 89.3 | | 0.356/1.168 | | 7.6 | | 0.4 |
| Polipropilen | 39.1 | | 0.356/1.168 | | 7.6 | | 5.25 |

Deneylerden elde edilen bu bilgiler ışığında çizgisel iz eğrileri, Şekil 2’de görüldüğü gibi karakterize edilmiştir. Bu eğriler, niteliksel olarak yorumlamak ve kıyaslamak için normalize edilmiş

verimini, “M/u” oranı ile aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi karakterize etmişlerdir:

Çizelge 2 – Çizgisel izlerin eğri benzetme verileri (7)

| Malzeme | Eğri-Benzetme Denklemi | Korelasyon Katsayısı R ² |
|--------------|---|-------------------------------------|
| Pleksiglas1 | $Y = 2.489 \times 10^{-3} (X-2.069)^2 - 0.0032$ | 0.999 |
| Pleksiglas1 | $Y = 2.038 \times 10^{-3} (X-11.51)^2 - 0.1037$ | 0.994 |
| Mermer 1 | $Y = 2.112 \times 10^{-3} (X-7.311)^2 - 0.0629$ | 0.998 |
| Mermer 2 | $Y = 2.115 \times 10^{-3} (X-7.023)^2 - 0.0692$ | 0.998 |
| Al 6061-T6 1 | $Y = 5.414 \times 10^{-3} (X-5.806)^2 - 0.0157$ | 0.997 |
| Al 6061-T6 2 | $Y = 3.072 \times 10^{-2} (X-1.657)^2 - 0.0259$ | 0.995 |
| Al 6061-T6 3 | $Y = 1.352 \times 10^{-3} (X-16.60)^2 - 0.0069$ | 0.990 |
| Polypropilin | $Y = 4.444 \times 10^{-3} (X-2.495)^2 - 0.0654$ | 0.998 |

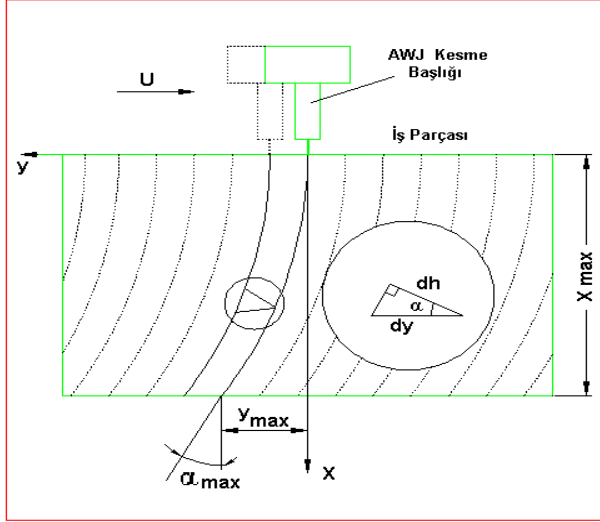
ve eğri benzetme uygulamasında, hepsinin bir parabol eğrisiyle çakıştıkları (0,990 – 0,999 arasındaki bir kolerasyon katsayısıyla) tespit edilmiştir. Eğri benzetme denklemleri ve R² kolerasyon katsayıları Çizelge 2’de gösterilen bu

$$\frac{M}{u} = \text{Cos}\alpha \text{ ve } \frac{M}{u} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4a^2(X-b)^2}} \quad (1)$$

Bu eşitliklerde;

α = çizgisel izlerin eğim açısı (çıkışta)

a, b= Eğri benzetme katsayılarıdır.
M = tek yönlü talaş kaldırma oranı
U = yanal ilerleme
X = İş parçasının işleme derinliği
(X_{max} = kalınlık



Şekil 2. Çizgisel iz eğrilerinin karakterizasyonu (7)

1 numaralı eşitlikten, AWJ ile işlemede kesme veriminin, su jeti iş parçasını terk ederken oluşturduğu çizgisel izlerin eğim açısına bağlı

olduğu görülmektedir. Bu sebeple, kesme işlemi sırasında bu çıkış açısı izlenirse ve bir geri besleme sinyali olarak kullanılırsa kesme derinliği veya yüzey kalitesi gibi önceden belirlenmesi gereken ayarlamaların hassas bir şekilde sağlanabileceği gösterilmiştir. Bu deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ışığında, kesme parametrelerine bağlı olarak belirlenen kritik jet çıkış açısı değerleri, Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Aynı çalışmada araştırmacıların vardığı genel sonuçlar:

- AWJ ile işlenen yüzeydeki çizgisel izler, bir parabol ile karakterize edilebilir.
- Kesme verimi, önemli ölçüde çizgisel iz eğrisinin eğimine bağlıdır.
- İş parçasının kalınlığının artmasıyla diğer parametrelere bağımlılık önemli olmazken geri tepme şartlarında kritik jet açısı azalmaktadır.
- Jet çıkış açısı kaba kesme uygulamalarında kesme hızını maksimize etmek ve jetin geri tepmesinden kaynaklanacak hasar ve yaralanmalar riskini azaltmak için bir kontrol parametresi olarak kullanılabilir.

Çizelge 3- Deneplerdeki işleme parametrelerine bağlı kritik jet çıkış açıları (7)

| Numune Malzeme | Kalınlık (mm) | Su Basıncı (MPa) | Orifis / Nozul Ölçüsü (mm/mm) | Aşındırıcı Akış Oranı (g/s) | Duruş Mesafesi (mm) | Kesme Hızı (mm/s) | Kritik Jet Çıkış Açısı ($^{\circ}$) |
|------------------|---------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Al 6061-T6 | 38.1 | 241 | 0.356/1.168 | 7.6 | 1.5 | 2.0 | 23.8 |
| Pleksiglas | | | | | | 3.5 | 18.3 |
| Polipropilen | | | | | | 0.2 | 21.8 |
| 901 Takım Çeliği | | | | | | 3.75 | 24.0 |
| Beyaz Mermer | | | | | | 10.5 | 35.4 |
| Al 6061-T6 | 9.5 | 241 | 0.356/1.168 | 7.6 | 1.5 | 2.0 | 23.8 |
| | 38.1 | | | | | 0.4 | 17.2 |
| | 88.9 | | | | | 1.3 | 25.0 |
| | 38.1 | 172 | 0.356/1.168 | 7.6 | 1.5 | 1.6 | 17.8 |
| | | 207 | | | | 2.0 | 23.8 |
| | | 241 | | | | 0.7 | 16.5 |
| | 38.1 | 241 | 0.229/0.787 | 7.6 | 1.5 | 2.0 | 23.8 |
| | | | 0.356/1.168 | | | 1.6 | 16.0 |
| | | | 0.457/1.575 | | | 1.6 | 19.8 |
| | 38.1 | 241 | 0.356/1.168 | 7.6 | 1.5 | 1.6 | 19.8 |
| 3.8 | | | | | | 2.0 | 23.8 |
| 7.6 | | | | | | 1.5 | 23.5 |

| | | | | | | | | | |
|---------------------|------|-----|-------------|-----|--|------|------|------|------|
| <i>Polipropilen</i> | 9.5 | 241 | 0.356/1.168 | 7.6 | | 27.0 | 23.7 | | |
| | 38.1 | | | | | 5.25 | 15.2 | | |
| | 88.9 | | | | | 0.5 | 10.2 | | |
| | 38.1 | 172 | 0.356/1.168 | 7.6 | | | 2.5 | 17.6 | |
| | | 207 | | | | | 3.0 | 18.1 | |
| | | 241 | | | | | 5.25 | 15.2 | |
| | 38.1 | 241 | 0.229/0.787 | 7.6 | | | 2.7 | 17.5 | |
| | | | 0.356/1.168 | | | | 5.25 | 15.2 | |
| | | | 0.457/1.575 | | | | 7.0 | 21.9 | |
| | 38.1 | 241 | 0.356/1.168 | | | | 3.8 | 15.3 | |
| | | | | | | | 7.6 | 5.25 | 15.2 |
| | | | | | | | 7.6 | 4.5 | 26.9 |
| <i>Beyaz Mermer</i> | 9.5 | 241 | 0.356/1.168 | 7.6 | | 24.0 | 30.7 | | |
| | 38.1 | | | | | 3.75 | 24.0 | | |
| | 88.9 | | | | | 1.0 | 17.6 | | |
| | 38.1 | 172 | 0.356/1.168 | 7.6 | | | 2.3 | 24.9 | |
| | | 207 | | | | | 2.5 | 21.0 | |
| | | 241 | | | | | 3.75 | 24.0 | |
| | 38.1 | 241 | 0.229/0.787 | 7.6 | | | 2.0 | 24.4 | |
| | | | 0.356/1.168 | | | | 3.75 | 24.0 | |
| | | | 0.457/1.575 | | | | 3.0 | 28.9 | |
| | 38.1 | 241 | 0.356/1.168 | | | | 2.0 | 17.2 | |
| | | | | | | | 7.6 | 3.75 | 24.0 |
| | | | | | | | 7.6 | 3.5 | 19.2 |

3. AWJ ile İşleme Sırasında Enerji Kaybı Sürecinin Deneysel Olarak Tahmini

Enerji kaybı süreci, malzemelerin AWJ ile işlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu durum, özgül enerji ve çizgisel izlerin oluşumu gibi, yöntemdeki ekonomiklik ve kaliteyle ilgili parametreleri etkilemektedir. Momber, Kovaçeviç ve diğerleri (16), iş parçalarının AWJ ile kesilmesinde enerji kaybı sürecini belirlemek ve değerlendirmek için deneysel bir metod geliştirmişlerdir. Çalışmanın birinci bölümünde, enerji kaybı sürecini; ısı oluşumu, erozyon kalıntılarının oluşumu, su-katı karışım filmi sönümlenmesi ve cidar sürtünmesi gibi farklı kısımlara ayırmak ve tanımlamak için fiziksel bir model tanıtılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde, deneysel metotlar ve bu fiziksel model kullanılarak elde edilen temel sonuçlar ele alınmıştır. Infrared (kızıl ötesi) termografi uygulaması, aşındırıcılı su jetlerinin ve tek parçacıkların darbe kuvvetleri etkisi, aşınma kalıntılarının boyut analizleri ile

kırılma mekaniği deneyleri detaylı olarak tanıtılmıştır.

Bu çalışmada, farklı enerji kaybı mekanizmalarıyla oluşan toplam kaybı tanımlamak için “X” parametresi kullanılmış olup bu mekanizmalar;

- Erozyon kalıntısı oluşumu sebebiyle enerji kaybı (M),
- Kesme önü yüzeyindeki sürtünme sebebiyle enerji kaybı (f),
- Kesme önünde su-katı filmi sönümlenmesi sebebiyle enerji kaybı (D)
- İş parçasındaki ısınma sebebiyle enerji kaybı (H)

olarak ayrı değerlendirilmiştir.

Bu mekanizmalara bağlı olarak enerji kaybı fonksiyonu X(h);

$$X(h) = M(h) + f(h) + D(h) + H(h) \quad (2)$$

veya

$$X(\Phi) = M(\Phi) + f(\Phi) + D(\Phi) + H(\Phi) \quad (3)$$

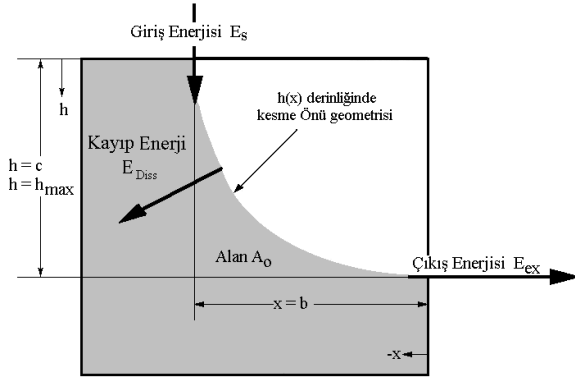
eşitlikleriyle ifade edilmiştir

Bu eşitliklerde, “h” işleme derinliğini, ifade ederken, “Φ” nispi işleme derinliğini ($\Phi = h/h_{\max}$) göstermektedir. Φ’nin bire eşit olması ($\Phi = 1$) giriş enerjisi E_s ’nin tamamının işleme sırasında, kayıp enerji E_{Diss} ’e dönüştüğü ve muhtemel en yüksek işleme derinliğinin gerçekleştirildiği anlamını taşıyan $X(\Phi)$ ’nin da bire eşit olması ($X(\Phi) = 1$) anlamı taşımaktadır.

3.1. Enerji Kaybı Fonksiyonu “X(h)” in Deneysel Olarak Tahmini

Enerji kaybı fonksiyonları $X(h)$ ve $X(\Phi)$ ’nin tahmini için kesme önü geometrisinin kullanılması fikri, ilk defa Momber ve arkadaşları (17) tarafından ortaya konmuştur.

Bu yaklaşımdaki temel varsayım Şekil 3’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3. AWJ ile işleme sırasında basitleştirilmiş enerji dengesi geometrik durumu (17)

Kesme önü geometrisi, matematiksel olarak parabolik bir fonksiyonla modellenmektedir (18,19). Şekil 3’de gösterilen A_0 alanı, bu parabolik fonksiyona bağlı olarak hesaplanmış ve kayıp enerjinin, önemli ölçüde işleme derinliğindeki artışa bağlı olduğu görülmüştür.

3.2. İş Parçasındaki Isınma Sebebiyle Enerji Kaybının (H(f)) Deneysel Olarak Tahmini

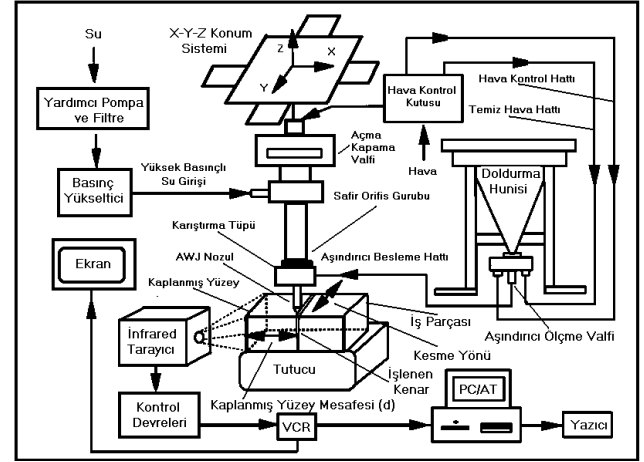
AWJ ile işleme sırasında, iş parçasındaki ısı oluşumunu belirlemek için infrared (kıızıl ötesi)

termografi (IR) kullanılarak bir teknik geliştirilmiştir. Bu aşamada karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirmek için, benzer ısı kapasitelere fakat farklı termal düfuzivitelere sahip, alüminyum (A 2024) ve titanyum (R 58640) iki malzeme kullanılmıştır. Kullanılan deney düzeneği, Şekil 4’te gösterilmiştir.

Deneysel çalışmaların değerlendirilmesinde kullanılan iki boyutlu hareket hattına sahip ısı kaynağı modeli ve ters ısı kondüksiyon metodu, Kovaçevič ve arkadaşları (20) tarafından tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda, ısı kaybı parametresi (H)’in aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebileceği ortaya konmuştur:

$$H = \frac{P_H \cdot t}{E_{Diss}} \quad (4)$$

Bu eşitlikteki “ P_H ” ısı akısı değişimlerine, pompa basıncındaki değişime ve yanıl ilerleme hızına bağlı olarak elde edilmiştir. P_H , pompa basıncındaki artışla doğrusal olarak artarken, yanıl ilerleme hızındaki artışla sürekli sabit kalmıştır.



Şekil 4. Infrared termografi ölçümleri için deney seti (16)

3.3. Erozyon Kalıntısı Oluşumu Sebebiyle Enerji Kaybının (M(f)) Deneysel Olarak Tahmini

AWJ’nin iş parçasına girerken sahip olduğu kinetik enerjinin belli bir kısmının, malzemeden erozyonla talaş kaldırmak için gerekli olduğu kabul edilmektedir. Gerekli olan bu enerji belli bir miktarda erozyon kalıntısı oluşturmaktadır. Kayıp enerjinin bu kısmını tahmin etmek için, iki farklı deney gerçekleştirilmiştir. İlk deney, malzemeden

belli hacimde talaş kaldırılması için malzemenin özgül kırılma enerjisine özdeş belli bir hacimde talaş kaldırılması sırasında kaybolan enerji varsayımına dayandırılmıştır. Kırılma enerjisinin, basınç altındaki malzemenin gerilim-gerinim (uzama) eğrisi altındaki alan olduğu kabul edilmiştir. Mühendislik malzemelerinin gerilim-gerinim eğrileri oldukça kompleks olduğundan, eğriler Matsui ve arkadaşları (21) tarafından öngörülen şekilde basitleştirilmiştir.

İkinci deney, kırılma işiyle orantılı bir malzemenin erozyon kalıntı yüzeylerini oluşturmak amacıyla gerekli olan enerji kabulüne dayandırılmış ve erozyonla aşınan parçacıkların oluşumu sırasında kaybolan enerji tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yöntem, ilk defa Kiesskalt ve arkadaşları tarafından (22) ortaya atılan, daha sonra Momber ve arkadaşları (23), tarafından geliştirilen teoriye dayanmaktadır. Dökme demir numuneler üzerinde gerçekleştirilen işleme deneyleri için kırılma işinin tespitinde ise Waferman ve arkadaşlarının (24) tespit ettiği değerler kullanılmıştır.

3.4. Sönümlenme Sebebiyle Enerji Kaybının Deneysel Olarak Tespiti

Bu aşamada ilk önce, tek bir parçanın darbe etkisinin sönümlenmesi ele alınmış ve daha sonra Aşındırıcılı su jeti ile işlemedeki sönümlenme değerlendirilmiştir. Darbe tesiri yapan tek bir aşındırıcı parçacığın kinetik enerjisinin bir bölümü, su ve su-aşındırıcı parçacıklarından oluşan katmanların yarattığı sönümlenme etkisiyle kaybolmaktadır. Zu ve arkadaşları (25), düşük darbe hızlarında (yaklaşık 5m/s), süreçte su mevcudiyetinin, biriken aşındırıcı taneciklerin ve işlenen malzemenin kaldırılan talaş parçacıklarının su akışıyla birlikte uzaklaştırılması sebebiyle, aşındırma işlemini iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır. Clark ve arkadaşları (26), kopan katı parçacıklar ile hedef malzeme arasındaki suyu dışarı atmak için gerekli basıncın, aşındırıcı taneciklerin darbe hızını azaltmak için yeterli büyüklükte olduğunu göstermişlerdir. Bu yaklaşımlar doğrultusunda, küresel nesnelere darbe temas analizlerini yapmak için Yong ve arkadaşlarının (27) savunduğu teori kullanılmıştır.

AWJ ile işlemede, belli bir derinlikte işleme için sönümlenme parametresinin tahmini, belli bir su-aşındırıcı film kompozisyonuna ve kalınlığına bağlı olarak karakterize edilmiştir. Genel olarak, kesme derinliğindeki artışla film kalınlığı da arta-

caktır. Ancak, AWJ ile iş parçalarının boydan boya kesilmesi durumunda ilâve deneylerin yapılması gerekli olmuştur. Böyle bir durumda aşındırıcılı su jeti, parçanın alt tarafından çıkarak iş parçasını terk edeceğinden, bir su-katı filminin sönümlenme etkisini ihmal edilmesi gerekecektir. Araştırmacılar böyle bir durum için, çıkış süspansiyon enerjisi ile AWJ giriş enerjisi arasındaki oranı, enerji kaybına sebep olan diğer faktörleri de dikkate alarak açıklamaya çalışmışlardır. Deneyler sırasında kuvvet ölçümleri, dört bileşenli bir piazoelektrik dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Momber ve arkadaşları tarafından (16), AWJ ile işleme sırasında kayıp enerjinin deneysel tahmini için detayları yukarıda verilen çalışmada, enerji kaybını karakterize eden bütün parametrelerin muhtemel tahminini yapabilmek için deneysel metodlar ile fiziksel bir model birleştirilip basit bir matematiksel-fiziksel model oluşturulmuştur.

4. Aşındırıcılı Su Jeti (AWJ) ile İşleme Yöntemlerinde Enerji Kayıplarının Matematiksel Olarak Modellenmesi

AWJ ile işlemede AWJ giriş enerjisinin bir bölümü, iş parçası tarafından tüketilmekte ve malzeme tahribatıyla şekillendirmeye yardımcı olmaktadır. Bazı araştırmacılar (16, 19, 23, 28, 29, 30), AWJ enerjisinin sadece çok küçük bir miktarının, malzemenin talaş kaldırmak için kullanıldığını ortaya koymuşlardır. Enerjinin kalan kısmı, sürtünme ve ısı oluşumu gibi farklı mekanizmalar sebebiyle kaybolmaktadır (20). AWJ enerjisinin önemli bir bölümü, jet iş parçasını terk ederken aşındırıcı, su ve malzemenin aşındırılmış parçacık karışımları tarafından yutulmaktadır (19).

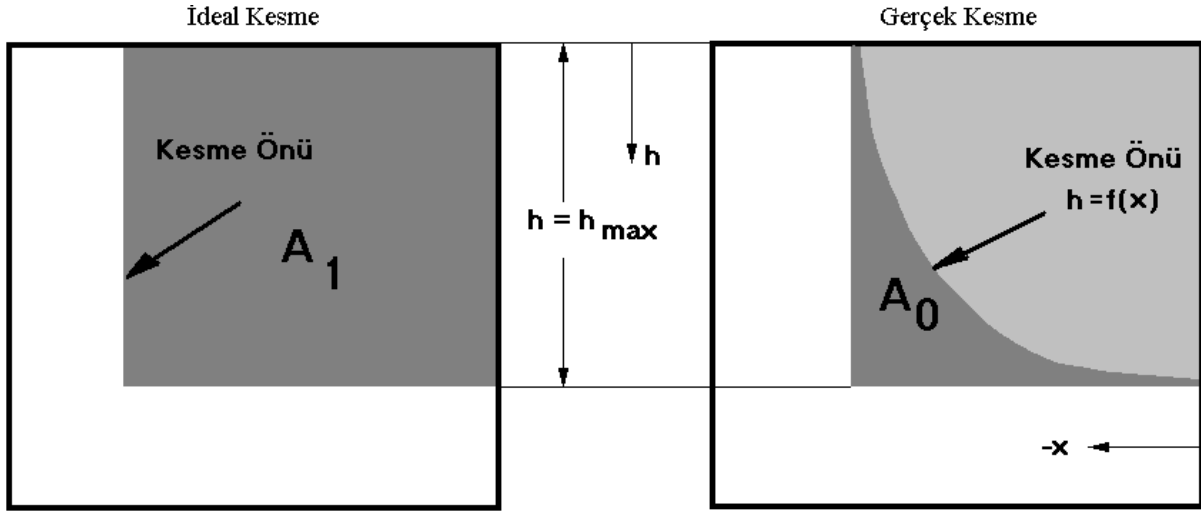
Capello ve Groppetti (31), geliştirdikleri enerji modelinde, negatif bir güç fonksiyonu kullandıkları bir yaklaşım sergilemişlerdir. Ancak bu varsayım, deneysel çalışmalarla doğrulanmamıştır. Aynı zamanda bu fonksiyon, sadece sınırsız bir işleme kalınlığı için toplam enerji kayıplarını tahmine yardımcı olabilecek özelliktedir. AWJ ile işleme sırasında enerji absorpsiyonu üzerine deneysel verilere dayalı ilk ciddi araştırmalar, Zeng ve arkadaşları (18), Momber ve Kovaçeviç (19), Raju ve Rumulu (15) tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk iki kaynak, çizgisel izlerin biçimini, parabolik bir fonksiyon kullanarak modellemiştir. Zeng ve arkadaşları, iş parçası ile AWJ çıkışı arasındaki açıyı

belirlemeyi hedefleyerek bu açıyı bir süreç kontrol parametresi olarak kullanmışlardır. Momber ve Kovaçević ise, işleme sırasında absorbe edilen enerji üzerinde kesme derinliğini göz önüne alarak enerji dengesine dayalı, iş parçası kesildikten sonra AWJ çıkış enerjisinin tahmini için bir hesaplama metodu geliştirmişlerdir. Raju ve Rumulu ise, çizgisel iz oluşumu için fiziksel bir model geliştirmişler ve düzgün kesme bölgesi ile kaba kesme bölgesi arasındaki geçiş bölgesiyle aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjisi arasında önemli bir ilişki olduğunu gözlemişlerdir.

Çizgisel izlerin oluşumuyla ilgili varsayım, kesme önü geometrisinin kullanılmasıyla malzemedeki enerji kaybı sürecini modellemeyi

biçimde tanımlanabilmektedir. Bu polinomun, numune malzemedeki değişimlere duyarlı olduğu gözlenmiştir. Deneyler aynı zamanda, nispi kesme derinliği ($\Phi(h) = h / h_{\max}$) ile enerji kaybı parametresi (X) arasındaki ilişkinin de ikinci dereceden bir polinomla ifade edilebileceğini göstermiştir. Bu polinomların regresyon parametrelerinin, işleme şartları kadar numune malzemesinden de bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

Momber'in geliştirdiği matematiksel modelin çıkış noktası, Şekil 5'te gösterilen, enerji kaybı olmadan oluştuğu kabul edilen ideal kesme önü geometrisi ile gerçek işleme sırasında oluşan kesme önü geometrisinin karşılaştırılmasıyla oluş-

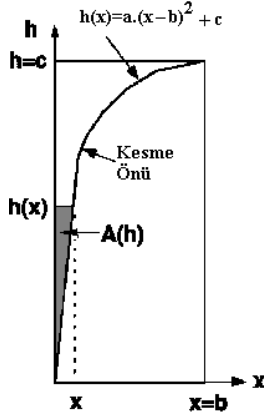


Şekil 5. Enerji kaybı olmaksızın ideal kesme ile gerçek kesmenin karşılaştırılması (32)

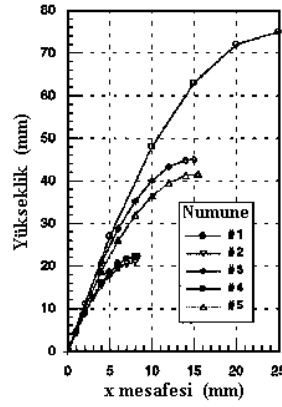
mümkün kılan, AWJ'nin bölgesel kinetik enerjisiyle ilişkilidir. Momber (32), enerji kaybının miktarsal olarak belirlenmesi için bu ilişkiyi kullanarak basit bir matematiksel model geliştirmiş ve enerji kaybı sürecinde kesme derinliğinin etkisini, matematiksel olarak tanımlamıştır. Model, iş parçası içindeki enerji dengesi kavramı üzerine oturtulmuştur. Enerji kaybı sürecini izah edebilmek için bir enerji kaybı parametresi ($X(h)$) tanımlanmıştır (16). İşlenen kesik cidarında oluşan kesme önü geometrisinin yapısına bağlı olarak bu parametrenin tespiti için matematiksel bir model geliştirilmiştir. Farklı işleme şartlarında, AWJ ile kesilen metalik, seramik ve mineral numuneler üzerinde yapılan deneyler, kesme derinliği ile enerji kaybı arasında doğrusal olmayan bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu ilişki, ikinci dereceden bir polinomla ($X(h) = Ah^2 + Bh + C$), etkili bir

turulan, Şekil 6'daki parabolik modeli esas almaktadır:

Farklı malzemeler üzerinde yapılan deneyler, bu parabolik modeli doğrulamaktadır (Şekil 7).



Şekil 6. Parabolik modelin yapısı (32)



Şekil 7. Farklı malzemelerin AWJ ile işlenmesinde oluşan kesme önü geometrisini parabolik modelleri (32)

Çalışmada, bu parabolik modellerle kurulan ilişkilerden enerji kaybı için kullanılabilecek katsayılar çıkarılmıştır ve enerji kaybının tahmini için kullanılabilecek eşitlikler, matematiksel olarak modellendirilmiştir.

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapılan araştırmalar AWJ ile işlemede, işleme yönünde kesik genişliğindeki değişim ve kesik yüzeyindeki çizgisel izlerin, doğrudan doğruya jet hüzmesinin enerjisindeki kayıplarla ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bu enerji kaybı sürecini karakterize etmek ve bir matematiksel model oluşturmak için yapılan araştırmalar değerlendirildiğinde, aşağıda özetlenen hususların ön plâna çıktığı gözlenmiştir:

- Değişik malzemelerin işlenmesinde, farklı kesme şartlarına bağlı olmaksızın, yüzeyde elde edilen izlerin birbirine benzerliği dikkate değerdir.
- AWJ ile kesilen yüzeydeki çizgisel izleri yorumlamak ve kıyaslamak için bir eğri benzetme işlemi uygulandığında, 0.990 – 0.999 arasında değişen bir korelasyon katsayısıyla, hepsinin bir parabol eğrisi ile temsil edilebileceği görülmüştür.
- AWJ ile işlemede kesme verimi, su jeti iş parçasını terk ederken oluşturduğu eğim açısına bağlıdır ve bu çıkış açısının izlene-

rek bir geri besleme sinyali olarak izlenmesi hâlinde yüzey kalitesiyle ilgili ön ayarların hassas bir biçimde yapılması mümkündür.

- Aşındırıcılı su jetiyle işleme sırasında, enerji kaybına sebep olan mekanizmalara bağlı olarak enerji kaybını hesaplamak için geliştirilen model, iş parçası içerisindeki enerji dengesi esasına dayanmaktadır.
- AWJ ile işlemede bir malzemenin enerji kaybı özelliklerini tanımlamak ve hesaplamak için, kalınlığa bağlı bir X(h) parametresi tanımlanabilmektedir.
- Enerji dağılım parametresi X(h), tahmin edebilmek için, kesme önü geometrisinin parabolik modeline bağlı bir model geliştirilmiştir.
- Nispi işleme derinliği Φ de olduğu gibi, mutlak işleme derinliği "h" ile enerji kaybı parametresi "X" arasındaki ilişki, ikinci dereceden bir eşitlikle tanımlanabilmektedir.
- Nispi işleme derinliği ile enerji kaybı arasındaki ilişkiyi tanımlayan ikinci dereceden polinom için, regresyon parametrelerinin işleme şartlarından bağımsız olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Akkurt, A., Şeker, U., Ercan, F., "Aşındırıcılı Su Jetiyle (AWJ) Kesmede Elde Edilen Yüzey Özellikleri-Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, Yayınlanmak üzere sunuldu
2. Hunt, C. D., Kim, T. J., Reuber, M., "Surface finish Optimization for Abrasive Waterjet Cutting", 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, The BHRA Conference Proceedings, Sendai, Japan, October, 1988.
3. Hunt, C. D., Burnham, C. D., Kim, T. J., "Surface Finish Characterization in Machining Advanced Ceramics by Abrasive Waterjet", 4th U.S. Waterjet Conference, Proceedings August 1987.
4. Burnham, C. D., Kim, T. J., "Statistical Characterization of Surface Finish Produced by Abrasive Waterjet", The 5th American

- Waterjet Symposium, Proceedings Toronto, Canada, August 1989.
5. Hashish, M., "Steel Cutting with Abrasive Waterjet" Proceedings of the 6th International Symposium in Jet Cutting Technology, pp. 465-487, BHRA Fluid Engineering. Ahdim 1982.
 6. Hashish, M., "A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive-Waterjets", ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol, 106, No. 1, pp. 89-100, Jan. 1984.
 7. Zeng. J., Heines. R., Kim T. J., "Characterization of Energy Dissipation Phenomenon in Abrasive Waterjet Cutting", 6th American Water Jet Conference, Proceedings, pp.163-177, August 24, Houston, Texas, 1991.
 8. Momber, A., "Handbuch Druckwasserstrahl – Technik", First Edition, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1993.
 9. Blickwedel, H., "Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen", Ph. D. Thesis, University of Hannover, 1990.
 10. Hashish, M., "Visualization of the Abrasive-Water Jet Cutting Process", Experimental Mechanics, Vol. 28, pp. 159-169, 1988.
 11. Chao, J., Geskin, E. S., "Experimental Study of the Striation Formation and Spectral Analysis of the Abrasive Water Jet Generated Surfaces", Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, pp. 27-41, Water Jet Technology Association, St.Louis, 1992.
 12. Hashish, M., "A Modeling Study of Jet Cutting Surface Finish", PED – Vol. 58, pp.151- 167, 1992.
 13. Arola, D., Ramulu, M., "Mechanism of Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of Common Aerospace Materials,", Proceedings of the 7th American Water Jet Conference, pp. 43-64, Water Jet Technology Association, St. Louis, 1993.
 14. Zhou, G., Geskin, E. S., Chung, Y.C., "Investigation of the Topography of Waterjet Generated Surfaces", PED – Vol.62 pp. 191-202, 1991.
 15. Raju, S. P., Ramulu, M., "Predicting Hydro-Abrasive Erosive Wear During Abrasive Water Jet Cutting", Manufacturing Science and Engineering, pp. 339-351, ASME, New York, 1994.
 16. Momber. A. W., Kovacevic, R., Kwak, R., Mohan. R., "Experimental Estimation of Energy Dissipative Processes in Workpieces During Abrasive Water Jet Cutting", 8th American Water Jet Conference, August 26-29, Houston, Texas, 1995.
 17. Momber A., "Schneidversuche an Stahlbeton mit dem Abrasiv- Druckwasserstrahlen", On und Stahlbetonbau, Vol. 89, pp.132-134, 1994.
 18. Zeng. J., Hines. R., Kim. T. J., "Characterization of Energy Dissipation Phenomena in Abrasive Water Jet Cutting", Proceeding of the 6th American Water Jet Conference, pp. 163-177, Water Jet Technology Association, St. Louis, 1991.
 19. Momber, A., Kovacevic, R., "Calculation of Exit Jet Energy in Abrasive Water Jet Cutting", Manufacturing Science and Engineering, ASME, New York, pp. 361-366, 1994.
 20. Kovacevic. R., Mohan. R., Beardsley. H. E., "Monitoring of Thermal Energy Distribution in Abrasive Waterjet Cutting Using Infrared Thermography", ASME, Transactions, Journal of Engineering for Industry, 1994.
 21. Matsui. S., Matsumura. H., Ikemoto. Y., Kumon, Y., Shimizu. H., "Prediction Equations for Depth of Cut Made by Abrasive Water Jet", Proceedings of the 6th American Water Jet Conference, pp. 31-41, Water Jet Technology Association, St. Louis, 1991.
 22. Kiesskalt. S. Matz. G. "Zur Ermittlung der Spezifischen Oberfläche von Kornverteilungen" VDI – Zeitschrift, Vol. 58, pp.58-60, 1951.
 23. Momber. A., Kwak. H., Kovacevic. R., "Investigations in Abrasive Water Jet Erosion Based on Wear Particle Analysis", Trans. ASME, Journal of Tribology, 1995.

24. Waterman. N. A., Ashby. M.F., “CRS-Elsevier Materials Selector”, Vol. 2, CRS Press, Boca Raton, pp.1479, 1991.
25. Zu. J. B., Burstein. G. T., Hutchings. I. M., “A Comparative Study of the Slurry Erosion and Free-Fall Particle Erosion of Aluminum”, Wear, Vol. 149, pp. 73-85, 1991.
26. Clark. H. M., Burmeister. L. C., “The Influence of the Squeeze Film on Particle Impact Velocities in Erosion”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 12, pp. 415- 426, 1992.
27. Yong. Z., Kovacevic. R., “Simulation of Effects of Water-Mixture Film on Impact Contact in Abrasive Water Jet Machining”, Trans. ASME, Journal of Tribology, 1995.
28. Momber. A., “Handbuch Druckwasserstrahl-Technik”, Beton Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993
29. Momber. A., “Schneidversuche an Stahlbeton mit dem Abrasiv-Druckwasserstrahlen”, Beton-und Stahlbetonbau, Vol. 89, pp.132-134, 1994.
30. Momber. A., Eusch. I., Kovacevic, R., “The Influence of the Stress-Strain Behaviour of Quasi-Brittle Materials on Their Machinability by Abrasive Water Jets”, International Conference of solids and materials Engineering, Singapore, 1995.
31. Capello. E., Groppetti. R., “On an Energetic Semi-Empirical Model of Hydro-Abrasive Jet Material Removal Mechanism for Control and Optimization” Jet Cutting Technology, pp. 101-120, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 1992.
32. Momber. A., “A Simplified Mathematical Energy Dissipation Model For Water Jet and Abrasive Water Jet Cutting Processes”, 8th American Water Jet Conference, pp. 829-843, August 26-29, Houston, Texas, 1995