



İMALATTA SU JETİ UYGULAMALARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Faruk MENDİ*, Mustafa Kemal KÜLEKÇİ**

*Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Bölümü, Ankara

**Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Düzce Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Bölümü, Düzce/Bolu

Geliş Tarihi : 20.04.1999

ÖZET

İmalat işlemlerinde su jetlerinin kullanılması oldukça yakın bir geçmişe dayanmaktadır. Ancak su jetleriyle kesilerek işlenebilen malzeme çeşitlerinin artması, kesme işlemlerinde arzu edilen sonuçların elde edilebilmesi, tekniğin verim ve güvenilirliğinin artmasıyla, özellikle son zamanlarda imalat teknolojisinde aranılan bir işlem olmuştur. Saf su jetleri ahşap, plastik, alüminyum, bakır gibi yumuşak malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. Aşındırıcı su jetleri ise; titanyum, inconel, cam, seramikler gibi oldukça sert olan malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. Söz konusu bu malzemelerin klasik talaş kaldırma yöntemleriyle kesilmesi imkansızdır. Kullanılan su jeti sisteminin basıncı, uygulama şekline göre 100Mpa-400Mpa, arasında değişmektedir. Aşındırıcı su jeti ile frezeleme, aşındırıcı su jeti ile kesme işlemlerinde kullanılan jet basıncı 400Mpa iken, su jeti ile yüzeyin dövülerek dayanım kazandırılması işleminde kullanılan jet basıncı, yaklaşık olarak 100Mpa'dır. Aşındırıcı su jeti ile kesme işleminde, suya abrasifin karışması olayı ile kesmedeki erozyon işlemi henüz tam olarak anlaşılammıştır. Bu incelemede, su jeti sistemlerinin prensipleri ile DIN tanımı 16 MnCr 5 E olan malzemeyle yapılan çalışmalara ait sonuçlar verilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Su jeti, Su jeti ile kesme, Su jeti ile yüzey işleme

REVIEW OF WATER JET APPLICATIONS IN MANUFACTURING

ABSTRACT

Usage of water jets in manufacturing processes, has been known for many decades. A wide range of engineering materials can be cut by water jets with satisfactory results. Enhanced reliability and efficiency of the technique, have yielded the technology greater interest for manufacturing applications. Water jets are used to cut soft materials such as wood, plastics, aluminium and copper. Abrasive water jets are used to cut very hard materials such as titanium, inconel, glass and ceramics. It is impossible to cut these materials with classical cutting technics. A water jet processing system utilises water pressure in the range of 100Mpa-400Mpa, for the different applications. In abrasive water jet milling and abrasive water jet cutting processes, the pressure of the jet is about 400Mpa. In water jet surface penning, the jet pressure is about 100Mpa. The process of abrasives mixing with the water stream is a complex phenomena. Erosion processes involved in cutting not yet fully understood. The lack of understanding the process call for other strategies in finding appropriate ways to obtain a precision depth in cutting operation. In this paper the principles of water jet systems had been explained . Results of experiments that made on cutting process and surface strengthening with water jet had been given.

Key Words : Water jet, Water jet cutting, Water jet surface penning

1. GİRİŞ

Bir sıvının çok yüksek bir basınçla sıkıştırılarak, herhangi bir malzeme üzerine yönlendirilmesi

durumunda, enerji dönüşümü için uygun durum sağlanmış olur. Basıncılı sıvı jetinin gönderildiği noktada meydana gelen enerji dönüşümü temas noktasında, malzemenin kırılmasına neden olur

(Tönshoff et al., 1997). Söz konusu kırılma veya aşınma, birkaç mekanizmanın bir araya gelmesiyle gerçekleşir. Kesme işleminde; kesme kuvveti, hidrostatik enerjinin malzemenin aşınmasını sağlayacak kadar kinetik enerjiye sahip bir jete dönüşmesiyle elde edilmektedir (Öjmerts, 1994). Aşındırıcı su jetleriyle yapılan ilk çalışmalar, aşındırıcı su jeti ile kesme ve işleme (tornalama-frezeleme) üzerinde yoğunlaşmıştır. Ancak daha sonra yapılan araştırmalarda yüksek hızlı jetlerin yüzey sertleştirmelerinde de kullanılabileceği anlaşılmıştır (Öjmerts, 1997).

Su jetleriyle yapılan kesme işlemleri, iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. Bunlar; saf su jeti ile kesme işlemi ve aşındırıcı yüklü su jeti ile kesme işlemidir. Dolayısı ile işlemler sırası ile su jeti ile kesme (Water Jet Cutting) ve aşındırıcı su jeti ile kesme (Abrasive Water Jet Cutting) olarak isimlendirilmektedir. Her iki işlemde de hidrolik güç ile tahrik edilen basınçlı sıvı, kesme başlığına gönderilir. Kesme işleminde, oldukça yüksek hız kazandırılmış bir su jeti kullanılmaktadır. İki işlem arasındaki fark, aşındırıcı jetlerde basınçlı jete küçük boyutlu aşındırıcıların karıştırılmasıdır (Summers, 1991).

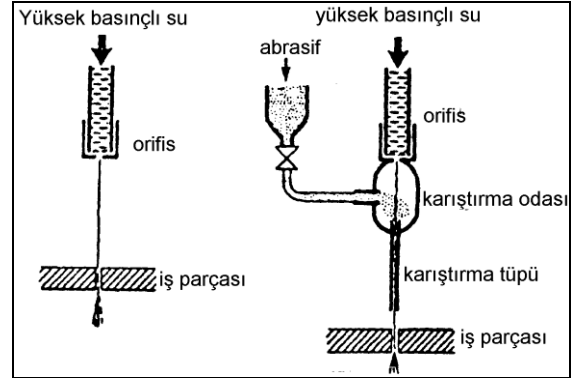
İşlemden kullanılan jet, bir sıvının (genellikle de suyun), kesme işlemleri için 400 Mpa basınçlarda, yüzey sertleştirme işlemlerinde yaklaşık 100 Mpa basınçlarda sıkıştırılması ve 0,1-0,6 mm arasında bir çapa sahip orifisten yol verilmesi ile elde edilmektedir (Haybeck, 1985). Gerekli orifis özelliklerine sahip nozularda malzeme olarak safir, elmas ve seramikler gibi sert malzemeler kullanılmaktadır. Elmas ve seramikler giderek daha çok tercih edilen malzeme olmaktadır (Ansorge, 1988). Basınçlı su içerisinde hapsedilen enerji, suyun saniyede 1000 metre (1000 m/s) hız yapmasını sağlayacak kinetik enerjiye eşittir.

2. SU JETİ İLE KESME

Kesme işleminde, hedef malzeme üzerine gönderilen jet, etkin olan birkaç mekanizmanın bir araya gelmesiyle, malzemeyi aşındırarak kesilmesini sağlar (Miller, 1994). Şekil 1'de iki ayrı kesme başlığının şematik resmi verilmiştir.

Saf su jetlerinin basınçlarının 685 Mpa (100 000 Psi)'a çıkarılması ile her ne kadar abrasif su jetleri ile kesilebilen malzemeler kesilebilirlerse de, aynı kalitede sonuç alınmamaktadır. Genelde saf su jetleri gözenekli, fiberli, granüle veya yumuşak

olarak karakterize edilen malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 1. Kesmede kullanılan nozul ve elemanları (Öjmerts, 1994)

Kesme işleminde gözeneklilik ve sertlik, önemli parametrelerdir. Cam, metaller ve seramikler gibi sert-yoğun malzemelerin başarıyla kesilebilmeleri için, aşındırıcı su jetlerinin sağladığı mekanizmalara ihtiyaç vardır (Tönshoff, 1994). Özellikle cam ve seramik gibi malzemelerin diğer kesme yöntemleriyle kesilmesi, oldukça zordur. Bu gibi malzemelerin kesilmesinde aşındırıcı su jeti kullanımı giderek artmaktadır.

Bir kesme işleminin gerçekleştirilebilmesi için, kesme başlığının istenilen yönde hareket ettirilebilmesi gerekir. Uygulanan ilk sistemler, şerit testereler şeklinde dizayn edilmiş olup, iş parçası el ile hareket ettirilmiştir. Nozul hareketlerini, önceden tanımlanan bir modele göre manuel olarak sağlayan sistemler de geliştirilmiştir. Modern uygulamalarda, operatörler için oldukça yüksek emniyet ve güvenilirlik sağlayan robotlar veya X-Y hareketi sağlayan iş bağlama tablaları kullanılmaktadır (Hashish, 1984). Sistemler genellikle operatörü ses ve kesme bölgesinden sıçrayacak partiküllerden koruyacak şekilde yalıtılmıştır. Sistemin yalıtılmasıyla, kesme hattından ayrılan veya ilk kesme esnasındaki delme işleminde, seken partiküllere karşı korunma sağlanmaktadır.

Su jeti kullanarak yapılan işlemlerin açıklanabilmesi için, önce bu alanla ilgili terminolojinin açıklanmasına ihtiyaç vardır. İçerisinde su jeti şekillenen aparat, orifis veya nozul olarak isimlendirilmektedir. Eğer sistemde, aşındırıcı içeren su jeti kullanılıyorsa, bu durumda aşındırıcı içeren su jetinin şekillendirilmesinde kullanılan aparat, aşındırıcı karıştırma tüpü, aşındırıcı nozulu, odaklama nozulu, konumlama nozulu veya ikincil nozul olarak isimlendirilir (Hashish, 1991a).

2. 1. Saf Su Jetleri

Saf su jetleri genellikle, sabit basınç altında işlenebilen yumuşak malzemeler ile, suyun iletmediği basıncın etkisi ile yapısında mikro düzeyde kırıklar meydana gelen gevrek malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır. İşlemden önemli olan parametreler; sıvı kütle akışı ve çarpma hızı olarak belirlenmiştir. Söz konusu parametreler pompa gücü ve nozul geometrisine bağlıdır (Öjmerts, 1994).

Kesilen malzemeye suyun temasının olumsuz etkilerinin olduğu durumlarda, örneğin hidrofilik plastik malzemelerin kesilmesi işleminde su yerine, bitkisel yağ veya alkol gibi diğer kesme sıvıları kullanılabilir. Bu şekilde gerçekleştirilen kesme işlemini, sıvı jeti ile kesme olarak isimlendirmek daha uygundur (Machin, 1989; Öjmerts, 1994).

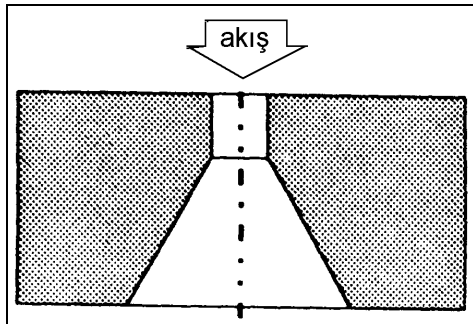
2. 1. 1. Saf Su Jetlerinde Kullanılan Nozullar

Su jeti ile kesme işleminde en önemli fonksiyon, jeti oluşturan nozul geometrisidir. Nozul hidrolik güç kullanımını ve hidrolik sistemin bir üretim kaynağı olarak kullanılmasını temin eder.

2. 1. 2. Aşırı Yüksek Basınç Nozulları

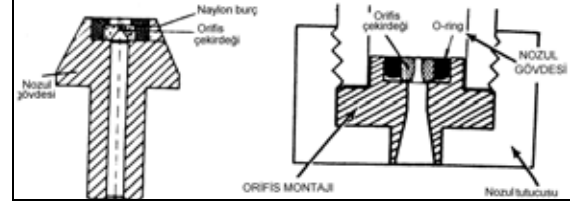
Endüstriyel kesme işlemlerinde uygulama alanı bulan sistemler, şiddeti artırılabilir türden birimler içeren ünitelerdir. Bu sistemler yüksek basınç-düşük akış kombinasyonu ile karakterize edilmektedir. Şekil 2'de görülen dairesel nozul geometrisinde akış girişindeki çap sabit, çıkışa doğru belli bir koniklikle genişlemektedir. Söz konusu geometriye sahip nozulların, yüksek hızlı su jetlerinin oluşturulmasında en iyi sonucu verdikleri kanıtlanmıştır (Öjmerts et al., 1997).

Eğer orifisteki dairesellik mükemmel değilse veya orifis yüzeyinden orifis boşluğuna açılan kenarlar temiz ve keskin değilse, jet akışı düzenli olmayacaktır.



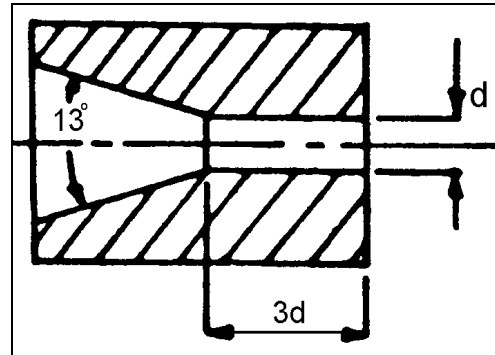
Şekil 2. Yüksek basınç nozul geometrisi (Öjmerts, 1997)

Orifis nozulu oluşturan boşluğa monte edilir. Monte edildiği yerden alınarak değiştirilebilir. Orifis piriç, naylon veya diğer yumuşak malzemeler içerisine yerleştirildikten sonra, paslanmaz çelik nozul gövdesi içerisine sıkı geçme yapılır. Şekil 3'de bu tür nozullara ait montaj şekli verilmiştir.



Şekil 3. Nozullarda kullanılan orifisler (Jönshoff, 1997)

Etkili bir jetin elde edilebilmesi için, orifise gelen sıvının sabit ve düzenli olması gerekir. Eğer akışta nozula girmeden önce bir düzensizlik meydana gelirse, jet nozuldan çıkar çıkmaz kırılacaktır. İdeal akış şartlarının oluşması için nozula yakın kısımda bükülme (dirsek) bulunmamalıdır. İdeal akış için nozul öncesinde sıvı akışını düzenleyecek, orifis ile eş merkezli ve çok iyi konumlandırılmış bir kovan kullanılmaktadır (Şekil 4). Kovan içerisindeki dairesel kesitli akış kanalı, akışta gerekli düzeni sağlayacak uzunlukta olmalıdır. Bu uzunluk kanal çapının 10-20 katı (tercihen 20) kadar olmalıdır (Labus, 1991). Genellikle orifis küçüldükçe, daha uzun ve düzgün akış elde edilir. Sistemde kullanılan nozul çapı, akış oranı ile sistem için gerekli beygir gücüne bağlıdır.



Şekil 4. Leach ve Walker nozulu geometrisi (Öjmerts, 1997)

2. 1. 3. Düşük Basınç-Yüksek Akış Nozulları

Düşük basınç-yüksek akış kombinasyonunda en çok kullanılan nozul şekli, Şekil 4'de verilen Leach ve Walker nozuludur. Bunun dışındaki nozullar her ne kadar etkili sonuç verilebilirlerse de, Leach ve Walker nozulunun imalatı oldukça basit ve kolaydır (Ansorge, 1988).

2. 1. 4. Temizleme Uygulamalarında Kullanılan Nozullar

Yüzeylerdeki istenilmeyen birikintilerin kazınması ve temizlenmesi gibi amaçlar için kullanılan nozullardaki dairesellik ve hassasiyetin, kesme amacıyla kullanılan nozullar seviyesinde olması gerekmez. Daha geniş bir jete ihtiyaç duyulan yerlerde, oval nozul veya fan jet nozulu kullanılabilir. Fan jet nozulu geometrik olarak bir düzlem ile kesilmiş yarı küreyi andırır. Geometrisi sayesinde nozul 15 ile 25 derece arasında değişen fan açıları oluşturur. Sonuçta daha geniş jet ve daha büyük temas alanı sağlanmış olur.

2. 1. 5. Nozul Malzemeleri

Su içerisinde yer alan partiküllerin çarpmalarına dayanabilmeleri için nozullar sert malzemelerden yapılmalıdır. Tablo 1'de uygulamalarda kullanılan basınca göre kullanılacak nozul malzemeleri listelenmiştir.

Tablo 1. Uygulanan Basınca Göre Nozul Malzemesi Seçimi (Öjmerts, 1994)

Nozul Malzemesi	Basınç
Pirinç, Çelik	<68 Mpa
Tungsten karbür	68-170 Mpa
Safir, Elmas	>170 Mpa

Nozul tasarımında sert malzeme kullanılması durumunda, imalat giderleri de göz önünde bulunmalıdır. Zira kompleks geometriye sahip nozulların imalatı ekonomik olmayabilir (Öjmerts, 1994).

2. 1. 6. Nozul Ömrü

Bir su jetinin fiziksel ölçümü, jetin nozuldan ayrıldıktan sonra, damlacıklara dönüştüğü mesafe esas alınarak yapılır. 50 mm'lik kesme mesafesi içerisinde jet zerrecikleri iyi bir yapışma özelliği gösterirler. Bununla birlikte nozul ve malzeme yüzeyi arasında müsaade edilen mesafe 50 mm'dir. Ancak uzun zincirli bir polimer (polietilen oksit) ilavesi, jet zerreciklerinin yapışma özelliğini artırarak, daha fazla kesme mesafelerinde çalışmasına olanak sağlar. Diğer taraftan ilave edilen polimerin yağlama etkisi nozul ömrünü uzatır.

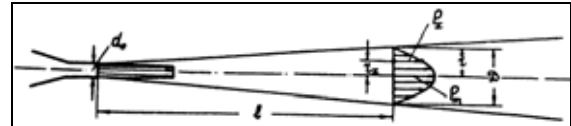
Kesme kalitesi üzerindeki en büyük etki jetin kalitesidir. Nozulun süreç içerisindeki durumunu görüntülemek için, akustik sinyaller kullanılabilir. Yapılan uygulamalarda elmas nozulların kullanılması, diğer malzemelerle yapılan nozulların sağlayacağı çalışma ömürlerinin oldukça üzerinde çalışma ömrü sağlayacaktır (Hashish et al., 1983).

2. 2. Jet Oluşumu

Yukarıda kısaca özetlendiği gibi, 400Mpa'dan daha fazla basınç uygulanmış (deneysel olarak geliştirilen basınç üniteleriyle 700Mpa'a kadar çıkarılabilmektedir) suya, küçük bir orifisten yol verilmesi halinde, oldukça yüksek hıza sahip jetler elde edilebilmektedir. Tüp içerisindeki hızı, saniyede bir kaç metre olan su orifise ulaştığında, oldukça yüksek bir ivme ile dışarı akmaya zorlanır. Sonuçta orifis çapına bağlı olarak, süpersonik hızlara sahip jetler elde edilir. Basıncı su orifise ulaştığında, sıvıdaki basıncın değerinde atmosferik basınç düzeyine kadar bir düşüş meydana gelecektir. Sistemdeki enerji sabit olduğundan, sudaki hidrostatik enerji kinetik enerjiye dönüşür ve yüksek hıza sahip su jeti elde edilir. Su basıncına (p) bağlı olarak, su jetinin hızı (v), Bernoulli denkleminde elde edilir (Fairhurst, 1986; Öjmerts, 1994; Öjmerts, 1997).

$$V = C_v \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (1)$$

Burada C_v hız katsayısıdır ve standart bir su jeti orifisinde sürtünmeler nedeniyle 0,98 alınır. ρ ise suyun yoğunluğudur. Yukarıdaki denklemden de görülebileceği gibi 400Mpa'lık bir işlem basıncında 900 m/sn'lik hızların elde edilmesi beklenir. Su jeti genellikle, iç yapısını görsel olarak incelemeye olanak tanımaz. Suyun orifisi terketmesiyle jet merkezinden yüzeyine doğru basınçta kademeli bir düşüş görülür. Jetin boyuna kesitinde basınç dağılımına bakıldığında, kenarlardan jet merkezine doğru hızlı bir basınç artışı sözkonusudur. Jetin orifisi terketmesiyle basınç profili değişir. Jetin dış kısmını oluşturan katman, kendisini çevreleyen hava ile olan sürtünme nedeniyle yavaşlar. Bu katman sırası ile merkeze doğru giden katmanları da yavaşlatır. Böylece Şekil 5'de görüldüğü gibi çana benzer bir basınç profili meydana gelecektir. Farklı basınç profiline sahip bir jet, sabit basınç profiline sahip jetlerle karşılaştırıldığında, basınç farkı nedeniyle, yüzeyden daha fazla malzeme uzaklaştırılır.



Şekil 5. Orifisten akan bir jet kesitindeki dinamik basınç dağılımı (Öjmerts, 1994).

Çatlakların açılmasıyla suyun daha derine penetrasyonu kırıklar meydana gelecektir.

Yüzeyinde büyük çatlaklar olan kaba taneli malzemelerde, ince taneli malzemelere göre daha kolay penetrasyon sağlanır.

Orifisten belirli bir uzaklıktan sonra jet, segmentlere ve damlalara dönüşmeye başlar. Damla darbe etkisi veya suyun çekiçleme etkisi olarak adlandırılan ve daha sonra irdelenecek olan etkiler nedeniyle, jetin ilk kırılmaya başladığı noktada, kesme performansı oldukça iyidir (Öjmerts, 1994).

2. 3. Saf Su Jeti İle Kesme İşlemi

Saf su jeti ile kesme işleminde su, hem bir güç dönüştürücü, hem de kesme vasıtası olarak görev yapar. Hedeflenen malzemeye jetin çarpmasıyla içerdiği kinetik enerji malzeme yüzeyinde durağan basınca dönüştür ve bunun sonucunda malzeme bütünlüğünde bozulma işlemi başlar. Bu işlemde iş parçası yüzeyi; büyüklüğü, su jeti hızı, jet geometrisi ve sıvı özelliklerinin (dönüştürülen hidrolik güç) fonksiyonu olan ve çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşen, yüksek bir basınç dönüşümüne maruz kalır. Parça yüzeyindeki basınç dönüşümü, nozul besleme basıncından birkaç kat daha yüksek olabilir. Sonuçta elde edilen etkiyle, yüksek kompresif dayanımlı malzemeler su jetiyle kesilebilmektedir. 310Mpa (45ksi) basıncındaki su jeti, parça yüzeyinde teorik olarak 965Mpa (140ksi) basınç oluşturarak, yüksek hızda erozyon meydana getirir (Slattery, 1987)

Yüksek basınçlı su jetleriyle malzemenin uzaklaştırılması işlemi; kompresyon, gerilim, kesilme, erozyon, kırılma, dalga tesiri, kavitasyon hasarı ve aşınmayı içeren karmaşık bir işlemdir. İşlemden hangi mekanizmanın baskın olduğu:

1. Yükleme tipine: sürekli su jetleri, darbeli su jetleri, nozul ve iş parçası arasındaki hareketler, nozul-iş parçası arasındaki mesafe.
2. Malzeme türü: Granüle malzemeler kavitasyon etkisini önemli kılar. Lifli malzemelerde ise gerilme kırılmaları oluşur.
3. Besleme oranı: Yüksek erozyon ve kesilme, düşük erozyon, kompresyon ve kavitasyon gibi parametrelere bağlıdır (Hashish ve duPlessis, 1978).

2. 3. 1. Nozul-Parça Arası Mesafe ve Erozyon Mekanizması

Jet taşınma esnasında parçalanarak küçük damlacıklara dönüşür. Bu durum farklı kesme mesafelerinde, farklı malzeme uzaklaştırma oranlarının ortaya çıkmasına neden olur. Mesafenin oluşturduğu bu farklılık, elde edilen kavitasyonların

geometrisine dikkatli bakıldığında görülebilir. İş parçası yüzeyine jetin çarpmasıyla oluşan krater şeklindeki boşlukta kısa mesafeden gönderilen jet yeni kırılmalara neden olur. Malzemede oluşan oyuk girişte küçük iken jet ilerledikçe, jetin oyuk yüzeyinden geri dönmesiyle giderek genişler. Girişte oluşan boğaz, oyuk içerisindeki basıncı artırarak daha yüksek erozyon oranlarına ulaşılmasına yardım eder (Murai ve Nishi, 1989).

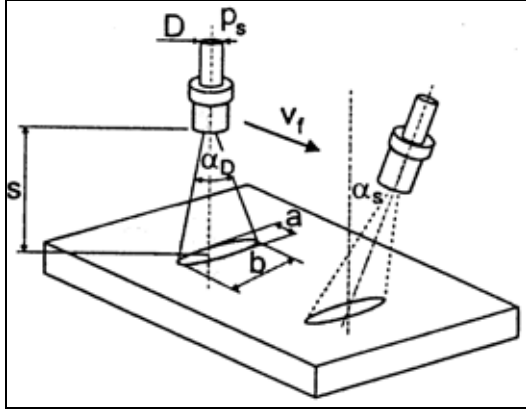
Mesafenin çok kısa tutulması durumunda, aşırı kırılmalar nedeniyle sağlıklı bir boğaz teşekkülü meydana gelmez ve buna bağlı olarak ulaşılan basınç seviyesi düşer. Mesafenin arttırılması durumunda başlangıçta, kesme noktasında malzeme uzaklaştırma oranı düşüktür. Ancak bunu takip eden aşamada, suyun küçük zerreciklerinin çekiçleme etkisi nedeniyle, malzeme uzaklaştırma oranı giderek artış gösterir. Parça yüzeyinde kesme işlemi sonucu meydana gelen kanal (oyuk) genişliği, jet çekirdeğini çevreleyen, damlacıklardan oluşmuş kesme katmanının çapı hakkında bilgi verir.

Yüksek basınçlarda ve nozul ile kesilecek parça arasındaki mesafenin arttırılması durumunda, jet zerrecikleri birbirine daha zayıf yapışır. Bu özelliklere sahip jetler, malzeme uzaklaştırma oranını arttırıcı yüksek frekanslı çarpma etkisi oluşturduklarından, gevrek malzemelerin kesilmesi işlemlerinde kullanılmaktadırlar (Hashish, 1991b).

3. SU JETİ İLE DÖVEREK YÜZEY DAYANIMININ MEKANİK OLARAK ARTTIRILMASI

Parça yüzeylerine özellik kazandırmak amacıyla yapılan diğer işlemler (örneğin yüzeyin kumlanması tekniği) ile kıyaslandığında, su jeti ile dövme işleminde kontrol edilecek parametre sayısı azdır. Bununla birlikte, dövmede kullanılan su jetinin kalitesinde süreklilik vardır. Bu özellikler su jeti ile döverek yüzey özelliklerini geliştirmede, işlem güvenilirliği ve işlemin kontrolünde kolaylık sağlar. İşlemin kalite kontrolde kolaylık sağlaması, otomasyon için düşük gider gerektirmesi, söz konusu işlemi endüstriyel uygulamalar için önemli kılmaktadır.

Yüksek basınçlı su jeti yardımı ile yüzeyin dövülmesi işleminin prensibi, Şekil 6'da gösterilmiştir. Nozul, V_f gibi bir hızla doğrusal olarak yüzeyin bir kenarından diğer kenarına doğru hareket eder. İşlemin parametreleri su basıncı P_s , nozul-yüzey arası mesafesi S , nozul hareket hızı V_f , dövme açısı α , nozul çapı D , nozul (veya jet) açısı θ dir.

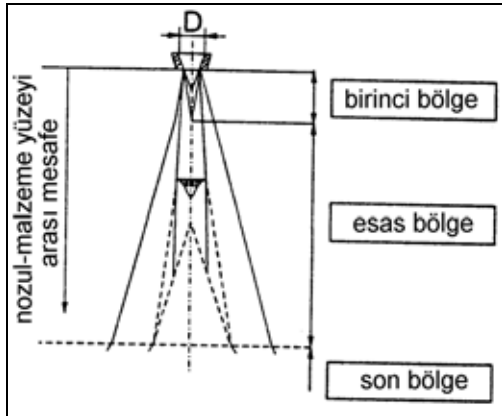


Şekil 6. Su jeti ile dövmede işlem parametreleri

Dövme süresi t , su jeti genişliği a ve nozul hızı V_f den hesaplanabilir (Tönshoff ve Kross, 1997).

$$t = \frac{a}{V_f} \quad (2)$$

Su jeti ile dövmede yüzey üzerinde istenilen maksimum etkinin sağlanabilmesi için uygun parametrelerinin tayin edilmesi gerekir. Uygun parametrelerin tayin edilebilmesi için ise su jeti yapısının çok iyi bilinmesi gerekir. Havada turbulans halinde su jetlerinin genel yapısı Yanaiida (1974) tarafından tanımlanmıştır. Nozul ile parça yüzeyi arasındaki mesafede jet, üç farklı özellik bölgesi gösterir (Şekil 7).



Şekil 7. Su jetlerinin genel yapısı (Tönshoff ve Kross, 1997)

Nozuldan hemen sonra gelen ilk bölgede jet, sürekli akış özelliğinde ve aksiyal dinamik basınçla sahiptir. Ancak bu bölgedeki basınç, yüksek dayanım özelliğine sahip malzemelerin yüzeyinde lokal (kısmi) deformasyon sağlayacak düzeyde değildir. Bu nedenle bu bölgedeki akışın yüzey özellikleri üzerinde hiç bir etkisi yoktur. Birinci bölgeyi takiben esas bölgede (damlalı akış bölgesi), su jeti

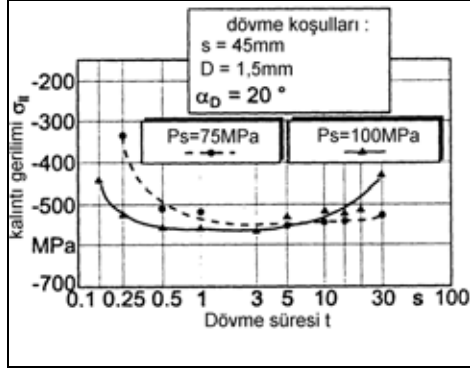
damlacıklara dönüşür. Bu bölgedeki damlacıkların yüzeye çarpmasıyla oluşan pikler halindeki yükler, birinci bölgenin sağlayacağı yüklerden oldukça yüksektir. Her bir damlacığın yüzeye çarpması sonucu, bir kaç mili saniye içerisinde çarpma noktasında basınç meydana gelir. Oluşan basınç, çarpma noktasında kalıntı gerilmeleri nedeniyle plastik deformasyon oluşturarak yüzey özelliklerini değiştirir.

Esas bölgeden hemen sonra jet d, difüzyonun (yayıma) meydana geldiği son bölge yer alır. Damlacıklar bu bölgeye ulaştıklarında, oldukça küçülürler. Bu nedenle söz konusu damlacıkların çarpma etkisinin, malzeme dayanımı üzerinde herhangi bir tesiri olmaz. Bu nedenle son bölge, yüzey sertleştirme işlemlerinde kullanılmaz. Farklı nozul- yüzey arası mesafeleri esas alınarak yapılan dövme işlemlerinde, yüzey kalıntı gerilmeleri ölçülmüştür.

75Mpa su basıncı, 108'lik bir dövme açısı ve 0,5 s'lik bir dövme süresi esas alınarak yapılan çalışmalarda: Nozul çapı 1,5 mm, nozul-yüzey arası mesafe 40 ile 80 mm arasında alındığında, hemen hemen 500 Mpa gibi maksimum bir kalıntı geriliminin meydana geldiği belirlenmiştir. Nozul-yüzey arasındaki 40-80 mm'lik bu mesafe, su jetinin mekanik etkisinin maksimum düzeye ulaştığı ve yukarıda özetlenen damla akış bölgesini temsil eder. Yüksek frekanslı, dinamik damla çarpma etkisi nedeniyle, iş parçası yüzeyinde tamamen dövülmüş bir katman ve bu katmanda jet genişliğine bağlı olarak, oldukça düzgün kalıntı gerilmeleri elde edilir (Hashish ve duPlessis, 1978).

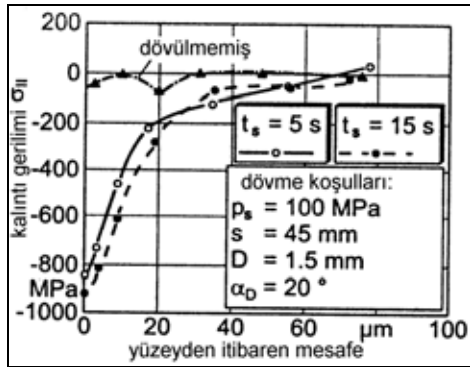
3. 1. Kalıntı Gerilmeleri

İşlem parametrelerinin sonuç üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak amacıyla birçok araştırma yapılmıştır. Şekil 8'de, farklı su basınçlarında dövme sürelerinin yüzeydeki kalıntı gerilmelerine etkisi verilmiştir. Dövme süresinin artırılmasıyla, kompressif kalıntı geriliminin miktarı, 560 Mpa gibi bir maksimum seviyeye çıkar. Dövme süresinin daha fazla artırılması durumunda, kompressif kalıntı gerilmesinde önemli bir düşüşün meydana geldiği tespit edilmiştir. 75 Mpa su basıncı kullanıldığında, maksimum kompressif kalıntı gerilimine, 5s sonra ulaşılmıştır. Kullanılan su basıncının, ulaşılabilecek maksimum kalıntı geriliminin seviyesi üzerinde etkisi yoktur. Ancak daha yüksek su basıncı kullanılması durumunda, maksimum kalıntı gerilimine daha kısa sürede ulaşılır. Örneğin 100 Mpa su basıncı ile çalışıldığında, maksimum kalıntı gerilimine 3s sonra ulaşılır (Tönshoff ve Kross, 1997).



Şekil 8. Yüzeydeki kalıntı gerilimleri (Tönshoff ve Kross, 1997).

Tekrar eden yüklerin tesiriyle, yüzeyin hemen altında kırılma başlangıcı meydana geldiğinden, mekanik olarak dayanımı artırılan katmanın kalınlığı oldukça önemlidir. Şekil 9'da sertleştirilmiş çelik (DIN tanımı 16 MnCr 5 E olan) numunenin, dövülme öncesi ve 100 Mpa'lık basınçla dövülme sonrası oluşan kalıntı gerilimlerinin derinlik profillerinin deneysel sonuçları verilmiştir. Numune yüzeyleri deney öncesinde elektrolitik parlatma işlemi ile oksidasyondan arındırılmıştır. Su ile dövme işlemi öncesinde, yüzeye yakın olan bölge (yüzeyden itibaren yaklaşık olarak 80µm'e kadar olan mesafe), hemen hemen tamamıyla gerilimden arındırılmıştır. 15 s'lik bir suyla dövme süresi sonunda, yüzeyde maksimum kompressif kalıntı geriliminin meydana geldiği belirlenmiştir. Yüzeydeki gerilimin değerinin 900 Mpa olduğu belirlenmiştir. Ancak yüzeyin yaklaşık 30µm altındaki bölgelerde dahi önemli kompressif kalıntı gerilmesi tespit edilmiştir. Dövme süresi 5s olarak uygulandığında, benzer derinlik profili ancak daha düşük seviyeli olarak elde edilmiştir.



Şekil 9. Kalıntı gerilimlerinin derinlik profilleri (Tönshoff ve Kross, 1997)

Söz konusu uygulamalarda diğer önemli bir durum da, yüzeye uygulanan ön şekillendirme işleminin suyla dövmede ulaşılan kalıntı gerilimine olan

etkisidir. Yüksek hassasiyetli parça geometrisi ile yüzey özellikleri gerekiyor ise distorsiyon ve oksidasyonu giderecek bir yüzey bitirme işlemine gerek duyulur.

Çoğu uygulamalarda bitirme işlemi yüzey taşlama ile yapılmaktadır (Tönshoff ve Kross, 1997).

4. JETLERDE ENERJİ VERİMİ

Saf sudan ibaret bir jet için gereken enerji miktarının hesaplanabilmesi için enerjinin korunumu prensibinden basit bir model geliştirilebilir. Hedeflenen malzemeye yönlendirilen suyun kütle oranını mw , hızı vin alalım. Kesme işlemi neticesinde malzemeden uzaklaştırılan kütle oranı mm ve malzemeye çarparak dönen su hızını da vo alır isek, bu durumda harcanan enerji oranı Ec :

$$Ec = 0,5(mw \cdot vin^2 - (mw + mm) \cdot vo^2) \quad (3)$$

Eşitliğin her iki tarafını ilk enerjiye böldüğümüzde jet verimini buluruz.

$$\eta = 1 - ((mw + mm) \cdot vo^2 / mw \cdot vin^2) \quad (4)$$

Buradan gerekli olan hidrolik enerji ηEc , hesaplanabilir. Nozul ucunda elde edilen su jeti enerjisine Eh dersek; gerekli olan enerji miktarı ve sistem verimliliğinin tespit edilebilmesi için, jetin nozuldan çıkış hızının deneysel olarak ölçülmesine ihtiyaç duyulur (Tönshoff, ve Kross, 1997).

4. 1. Jet ile Kesme İşleminde Modelleme Yaklaşımları

Su jeti ile kesme işleminin modellenmesi ile ilgili ilk çalışmalar, Hashis ve duPLessis (1978) tarafından yapılmıştır. Geliştirmiş oldukları eşitlik:

$$\frac{z}{dn} = \frac{1 - \frac{\delta y}{\rho V^2}}{2Cf} \cdot (1 - e^{-\frac{2Cf}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\rho V}{\eta} \cdot \frac{V}{u}}) \quad (5)$$

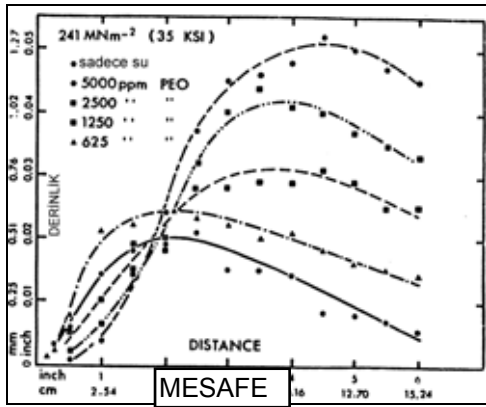
Burada, z = kesme derinliği
 Cf = hidrodinamik sürtünme katsayısı
 η = malzeme ıslanma katsayısı
 δy = malzemenin basma dayanımı (compressive strength)
 V = jet hızı
 u = besleme oranı
 p = sıvı yoğunluğu
 dn = nozul çıkış çapı

4. 2. Jet İle Kesme İşleminin Geliştirilmesi

Besleme suyuna % 0,1-0,3 oranında uzun zincirli polimer ilave edilmesiyle, kesme işleminde kullanılan jetteki akış kayıpları düşürülür ve jet kalitesi geliştirilir. Bununla birlikte, bu ilave malzemenin sağlayacağı etkiler, maliyet de göz önünde tutularak değerlendirilmelidir. Geliştirilen jet donanımlarının çoğunda, etkileri henüz garanti edilmediğinden polimer eklentisine izin verilmez. Ancak polimer vb malzemelerin eklenmesi ile jet kalitesinin geliştirilmesine çalışılmaktadır.

Polimer eklentisinin sağladığı yağlama etkisi, sıvının yoğunluğunu arttıran yoğunlaştırıcıların ve nozulun daha az aşınmasını temin ederek, bakım ve çalıştırma masraflarının düşmesini sağlar. Bu şekilde bir yağlamanın sağlanmasıyla, elmas nozullarında çalışma ömrünün üç kat arttığı tespit edilmiştir. Polimer ilavesi jetin stabilitesini sağlayarak ideal akış şartlarını temin eder (Singh, 1991).

Polimer ilavesi ile jet zerrelerinin birbirine daha fazla yapışması, sıvıdaki basınç düşüşlerini karşılar ve buna bağlı olarak basınç attırıcı olarak çalışan ekipmanlardan tasarruf sağlar. Şekil 10'da alüminyumun kesilmesi işleminde kullanılan jetin sağladığı penetrasyona, polimer eklentisinin etkisi verilmiştir.



Şekil 10. Alüminyumun kesilmesinde polimer eklentisinin jet penetrasyonuna etkisi (Öjmerts, 1994)

Şekilden de açıkça görüleceği gibi, polimer eklentili jetler 50 mm'lik kesme mesafesinden sonra, saf su jetlerinin sağladığı kesme derinliğinin (penetrasyonunun) oldukça altına düşmektedirler (Öjmerts, 1994).

Polimer eklentisi ile elde edilen jetlerdeki polimerler, nozul içerisinden geçerlerken kırılmaktadırlar bu nedenle tekrar kullanılması tavsiye edilmez. Kullanılması durumunda ilk performansın elde edilmesi mümkün olmaz.

5. SONUÇ

Son yıllarda endüstriyel çalışmalarda, kullanılan alışılmadık imalat işlemleri içerisinde su jeti uygulamaları, oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle klasik talaş kaldırma yöntemleriyle kesilmesi ve şekillendirilmesi oldukça zor olan malzemelerin işlenmesinde, su jeti teknolojisine olan ilgi giderek artmaktadır. Aşındırıcı su jetleri, oldukça sert olan titanyum, inconel, seramikler, cam gibi malzemelerin kesilmesinde başarıyla kullanılmaktadır. Söz konusu bu malzemelerin çoğu uçak teknolojisinde kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde; preslenmiş fibrenin, kapı panellerinin kesilmesi ve düzeltilmesi, döküm parçalarda döküm artıklarının, temizlenmesi ve kompozit malzemelerin kesilmesi işlemlerinde kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak, basınçlı su jeti yüzey sertleştirme uygulamalarında da kullanılmaktadır. Söz konusu işlemde, yüzey basınçlı su jeti ile dövülerek yüzeyde belirli bir kalınlıkta kalıntı gerilimi oluşturularak, yüzeylere özellik kazandırılmaktadır.

İşlemin tanımlanması ve modellenmesi için, erozyonla aşındırmaya dayalı araştırmalar yapılmaktadır. Su jeti teknolojisindeki gelişmeler, yapılan ampirik çalışmalarla elde edilmiştir. Bazı uygulamalarda suyun olumsuz etkisi nedeniyle, jet içerisinde su yerine diğer sıvılar (yağlar), kullanılmaktadır. Bu durumda işlem sıvı jet ile kesme, olarak isimlendirilmektedir.

Günümüzde Amerika ve bazı doğu Avrupa ülkeleri, su jeti donanımlarında kullanılan ekipmanların imalatını ve satışını yapmaktadırlar. İşleminin uygulama alanları, gün geçtikçe artarak devam etmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Ansorge, A. 1988. Fluid Jet Principles and Applications, **Proceedings Conference of Non-Traditional Machining**.
- Fairhurst, R. M., Heran, R. A., Saunders, D. H., DIAJET, 1986. A New Abrasive Water Jet Cutting Technique, **8th International Symposium On Jet Cutting Technology**, September, BHRA, Durham, England.
- Hashish, M., duPlessis, M. P. 1978. Experimental Investigation of Continuous Jet Penetration of Solids, **Journal of Engineering For Industry**, Vol. 100 February.

Hashish, M., duPlessis, M. P. 1978. The Application of a Generalised Jet Cutting Equation, Proceedings of the 4th **International Symposium On Jet Cutting Technology**, , BHRA Fluid Engineering.

Hashish, M., Manserud. D. O., Bondurant, P. D., Hake, J. C. A. 1983. New Abrasive-Water Jet Nozzle for Automated and Intelligent Machining, **Proceeding of the 7th American Water Jet Conference**, August 28-31, Seattle, WA, USA.

Hashish, M. 1984. Cutting With Abrasive Water Jets, **The Carbide and Tool Journal**, Sept-Oct.

Hashish, M. 1991a. Optimisation Factors in Abrasive Water Jet Machining, **Journal of Engineering For Industry**, Vol. 113, February.

Hashish, M. 1991b. Precision Machining With Abrasive Water Jets, **Proceedings of the 6th American Water Jet Conference**, Aug, 24-27, Texas, USA.

Haybeck, R. 1985. Water Jet Cutting, SME Technical Paper MM 85-651, Conf. Automach Australia 85, 2-5 July, Melbourn, Australia.

Kross, F. 1996. **Randzonenverfestigung Durch Hochdruck Wasserstrahlen**, DR.-Ing. Dissertation University of Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr 375, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Labus, T. J. 1991. High Pressure Equipment and Systems **Fluid Jet Technology-Fundamentals and Applications**, ISBN 1-880342-01-4, Publ, by the WJTA, St. Lois, MO, USA.

Machin, D. 1989. **Industrial Water Jet Cutting, Jet Tec 89**, BHRA, Publication.

Miller, R. K. 1994. **Water Jet Cutting: Technology and Applications**, the Fairmont Press Inc.

Murai, H., Nishi, S. 1989. Structure of Water Jet and Erosion of Materials, **Proceedings of the 5th American Water Jet Conference**, August 29-31, Toronto Canada.

Öjmerts, C. 1994. **Abrasive Waterjet Machining**, Chalmers University of Technology, January, Göteborg, SWEDEN.

Öjmerts, C. 1997. **A Study On Abrasive Waterjet Cutting**, Chalmers University of Technology, Göteborg, SWEDEN.

Singh, P. J. 1991. Some Recent Advances in Water Jet Cutting Technology, Water Jet Cutting Systems, SME Conference, Mrch 19-20, Schaumburg, IL USA.

Slattery, T. J. 1987. Abrasive Water Jet Carves Out Metal Working Niche, **Machine and Tool**, Blue Book, V. 82, No. 7, pp. 31-34, July.

Summers, D. A. 1991. Historical Perspective of Fluid Jet Technology, **Fluid Jet Technology-Fundamentals and Applications**, ISBN 1-880342-01-4, Publ.by the WJTA, St Lois MO, USA.

Tönshoff, H. K. 1994. Wobker, H.G., Brand., **Turning-Substitute For Grinding Operations**, Euro-Metal Working, Udine, Italy.

Tönshoff, H. K., Kross, F., Marzenell, C. 1997. **High-Pressure Water Peening-a New Mechanical Surface-Strengthening Process**, Annals of the CIRP Vol. 46/1.

Yanaida, K. 1974. Flow Characteristics of Water jets, **2.Int. Symp. On Jet Cutting Technology**, BHRA, Fluid Engineering, Cranfield.