

AŞINDIRICILI SU JETİ UYGULAMALARI VE ÜRETİMDE YOĞUN KULLANIMA SAHİP MALZEMELERİN DELİNMESİ

Adnan AKKURT

H.Ü. Hacettepe Meslek Yüksekokulu, 06800, Ankara

Alınış: 8 Şubat 2006
Kabul Ediliş: 22 Haziran 2006

Özet: Aşındırıcı Su Jeti (AWJ) ile kesme, endüstriyel amaçlı malzemelerdeki gelişmelere paralellik gösterecek şekilde, bilinen tüm malzemelerin özellikle de işlenmesi güç malzemelerin işlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Kesme yöntemlerindeki işleme kalitesi genel olarak; malzeme özelliklerindeki değişim, elde edilen yüzey özellikleri ve kesilen kanalın geometrisi ile karakterize edilmektedir. Bu çalışmada aşındırıcılı su jeti ile günümüzde gittikçe yaygınlaşan tornalama, frezeleme ve delme işlemleri ile bu işlemler sırasında dikkat edilmesi gereken hususlar ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcı su jeti ile kesme, Su jeti teknolojisi, İleri aşındırıcılı su jeti uygulamaları

Experimental Applications of Abrasive Water Jet

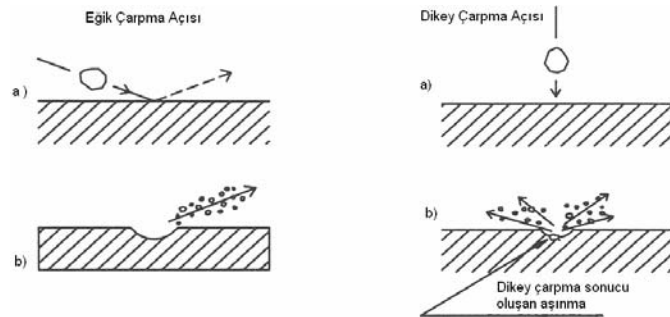
Abstract: Abrasive water jet (AWJ) cutting process is being developed related to developments in industrial materials and is used effectively in cutting application of hard to cut materials. The quality of cut surface is generally characterized by obtained surface texture, the geometry of kerf. In this study the details which must be pay attention during the processes that are widely used in industry such as AWJ milling, turning and drilling operations are given.

Keywords: Abrasive water jet cutting, Water jet technology, Advanced Abrasive Waterjet Applications

Giriş

Aşındırıcılı su jetinin tüm mühendislik malzemelerini kesme yeteneğinin yanı sıra frezeleme, tornalama ve delme gibi pek çok mekanik işlemlerde 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 anlaşılmalıdır. 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, aşındırıcılı 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. Aşındırıcılı su jeti, bu uygulamalar için iyi bir çözüm oluşturmaktadır. Bu çalışmanın amacı; aşındırıcılı 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).

AWJ PARAMETRELERİ	İŞLEME PARAMETRELERİ					
	DOĞRUSAL KESME	DELME	FREZELEME	TORNALAMA		
Basınç Su Jeti Çapı Karırtma Tüpü Boyu Karırtma Tüpü Çapı Aşındırıcı Malzemesi Aşındırıcı Büyüklüğü Aşındırıcı Akış Oranı Aşındırıcı Durumu	Açı Yaklaşma Mesafesi İlerleme Yönü Paso Sayısı Malzeme Kalınlığı	Açı Yaklaşma Mesafesi Bekleme Süresi Basınç Profili Malzeme Kalınlığı	İlerleme Yönü Yüzeysel Artış Paso Sayısı Süpürme Sayısı	Devir Sayısı Dönüş Yönü Açı İlerleme Yönü İlk Çap Son Çap Talaş Derinliği		
İŞLEME ÖZELLİKLERİ						
	İlerleme Yönü Bitirme Yüzeyi Kesme Geniřliđi	Çapı Delme Zamanı Delik Şekli	Hacimsel Talaş Kaldırma Oranı Derinlik Kontrolü	Dönüş Çapı Bitirme Yüzeyi İşleme Zamanı		
TORNALAMA İŞLEMİ	KALINLIK KESME	PROFİL KESME	KONİK KESME	FREZELEME İŞLEMİ	DELME İŞLEMİ	YÜZEY BİTİRME İŞLEMİ

Şekil 2. AWJ uygulamaları, işleme parametreleri ve işleme özellikleri (Hashish, 1993).

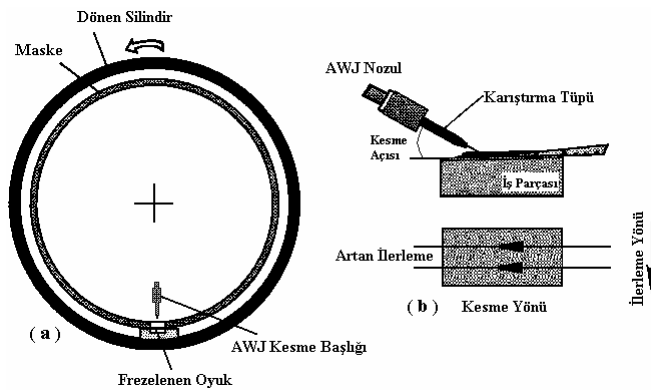
2. Frezeleme

2.1 Frezeleme metotları

Frezeleme işleminde amaç, istenilen ölçüde bir oyuk oluşturmaktır. AWJ ile frezeleme, jetin malzemeyi tamamen delmesini engelleyip istenen derinliğe kadar girmesini sağlayarak gerçekleştirilir. Bu, jetin nispeten büyük bir hızla hareket ettirilmesiyle sağlanır (Öjmertz, 1997). Kesme işlemi büyük oranda parçacık erozyonuyla gerçekleştirildiği gibi frezeleme operasyonu için uygun bir diğer terim, üç boyutlu kontrollü erozyondur. Bu işlem çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir. AWJ ile çalışırken en büyük engel, düzensiz kesme derinlikleridir. Bu jetin rastlantısal doğasından, teknik düzensizlikler ve hassasiyetinden (aşındırıcı şekli ve miktarı, su basıncı gibi) kaynaklanır. Daha iyi yüzey kalitesi için bu düzensizlikler kontrol altına alınmalı veya etkisi azaltılmalıdır. Günümüzde iki farklı şekilde ki frezeleme teknikleri kullanılmaktadır (Şekil 3). Her iki frezeleme tekniğinin dayandığı strateji, birim yanal hız değeri için düşük miktarda enerji transferi ile teknik düzensizliklerin etkisini azaltmaktır. Bu, jet-malzeme etkileşimi; düzensizliklerin etkisini minimuma indirir ve kesme derinliğindeki düzensizlikleri önler. Yukarıda anlatılan strateji, jet yanal hızını artırarak, jetin malzemeye etki süresini azaltarak veya düşük enerji yoğunluğu olan bir jet kullanılarak sağlanabilir (Labus, 1991 – Momber, 1998).

Yüksek yanal hızlarda dönüş hareketi ile kartezyen hareketi çok daha kolay elde edilir. Düzeni x doğrultusunda ileri geri hareket ettirip y doğrultusunda işlemek yerine, dönen bir tezgâh veya silindirin üzerinde çevirirken jeti yanal olarak hareket ettirmek suretiyle uygun kontrol sağlanabilir. Her iki metot, Şekil 3'de gösterilmiştir (Hashish, 1989).

Yüksek yanal hız frezeleme, günümüzün en başarılı tekniğidir. Derinlik hassasiyeti yaklaşık 0.025 mm'dir. Dip yüzeylere eğim vermek için, yanal hızı artırılıp azaltılabilir. Kesilmesi istenmeyen tüm yüzeylerin, donanım da dahil olmak üzere, korunması ihtiyacı bu yöntemin tek sakıncalı yönüdür. Bu teknik, oldukça basittir ancak hazırlık aşaması maskeleymeden dolayı zaman alıcıdır. İlerleme miktarı ve talaş kaldırma miktarı bağıntısı Şekil 4.'de değişik frezeleme uygulamaları Şekil 5.'de gösterilmiştir (Momber, 1988).

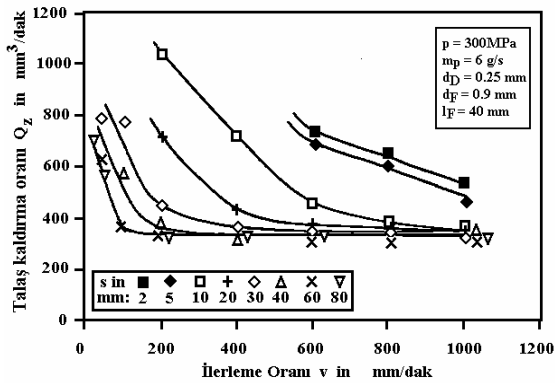


a) Hızlı yanal hız modeli

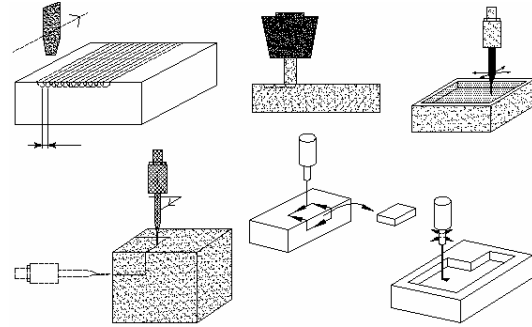
b) Hassasiyet kontrol modeli

Şekil 3. Aşındırıcılı su jetiyle frezeleme metotları (Momber, 1988).

Hassasiyet Kontrol Modeli: Eğer en önemli parametreler etkin biçimde kontrol edilebilseydi bu standart, AWJ sistemlerine uygulanabilen pratik bir frezeleme tekniği sağlardı. Günümüzde araştırmalar, böyle bir frezeleme projesinin kontrolü için uygun parametrelerin tanımlanması üzerine yapılmaktadır. Yanal hızın, işleme hızına etkisi üzerine çalışmalar; kritik bir yanal hız olduğunu, bu hızın altında azalan yanal hızla malzeme işleme hızının arttığını göstermiştir. Kritik yanal hızı, nozulun iş parçasına uzaklığı büyüdükçe artar. Kritik yanal hızı, geçilen uzunluk üzerindeki kritik enerji yoğunluğuyla ilişkilidir. Düşük enerji yoğunluklarında işleme, durağan bir davranış gösterirken enerji yoğunluğunun artmasıyla (yanal hızın azaltılmasıyla yada aşındırıcı oranının artırılması) işleme hızını arttıran fakat yarığın dip yüzeyi topografisinin bozuk olmasına neden olan dairesel deformasyon aşınması oluşur (Ohlsson, 1994 - Öjmertz, 1997)



Şekil 4. İlerleme miktarı ve talaş kaldırma oranı bağıntısı (Momber, 1988).



Şekil 5. Değişik frezeleme uygulamaları (Öjmertz, 1997)

2.2. Frezeleme ile elde edilen yüzey

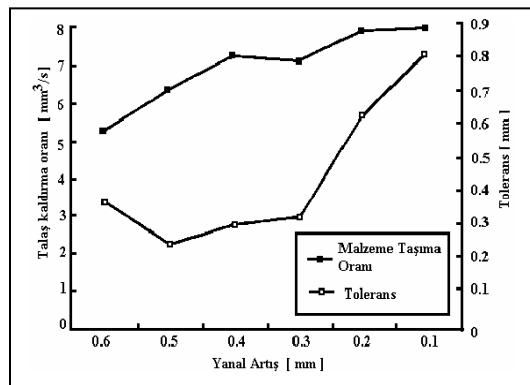
AWJ ile frezelemede yüzeylerden bahsederken en önemlisi, dip yüzeydir. Oluşan dip yüzey, değişken kesme performansının bir sonucu olan, derinlik düzensizlikleriyle karakterize edilir. Derinlikteki sapmalar yüksek yanıl ilerleme hızlarında ve jetin enerji yoğunluğunun düşük olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Yüzey morfolojisi; kesme işlemleriyle dönen yüzeylerde erozyon mekanizmasından dolayı farklıdır. İşlem zorluğu, yüzey kırılmaları ve parçacık gömülmeleri gibi problemler, AWJ yöntemiyle yapılan frezelemede daha azdır. (Hashish, 1989 - Akkurt, 2002) .

2.3. Parametre optimizasyonu

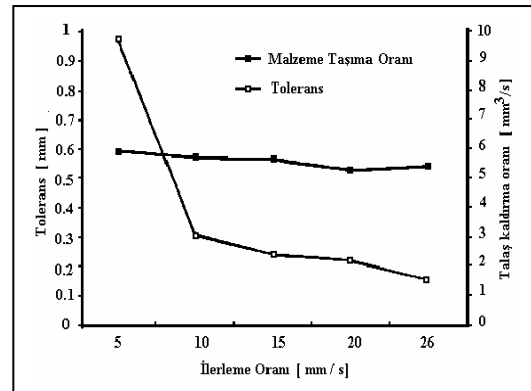
Hassas bir kesme derinliği elde etmek için modern bir istatistik metot kullanarak yapılan bir çalışmadan da görüleceği gibi büyük kesme derinliği hassas yüzey pürüzlülüğü ve düşük dalgalılık gibi parametrelerin kontrol edilmesi gerekmektedir. Zira bu parametreler önemlidir.(Hashish, 1993) .

Aşındırıcı kütle akışı tüm uygulama kriterlerini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yüksek aşındırıcı akışı, işleme hızını artırır ve daha düzgün yüzeyler oluşturur. Bunu yanıl ilerleme hız oranı takip eder. Düşük yanıl hız oranı, düzensiz bir dip yüzeyi topografyası oluşturur fakat yüzey daha pürüzsüz olur.

Su basıncı; kesme derinliği ve yüzey dalgalılığını etkileyen bir faktör olarak bulunmuştur. Ayrıca şekillendirilebilir malzemelerle yapılan deneylerde kesme derinliğinin, yüzey dalgalılığını ve pürüzlülüğünün, yatık bir jet açısından iyi yönde etkilendiği bulunmuştur. Mikroskobik yüzey özellikleri toplam enerji aktarımını kontrol eden parametrelere aşındırıcı parçacıklara ve onların doğrultusuna bağlıdır. AWJ ile açılan olukların örtüşme derecesi de yüzey kalitesi bakımından önemlidir. Yapılan çalışmalara göre işleme hızı, AWJ çapının 0,7-0,8 katı kadar örtüşme durumunda birden yükselir. Neyse ki bu optimum yüzey kalitesine yakındır. Şekil 6' de gösterildiği gibi, daha büyük örtüşmelerde daha büyük hızlar elde edilir. Bu durum, daha önce kesilen yüzeylerin incelmış yerlerinde daha küçük çarpma açılardaki etkili aşınmadan kaynaklanır. Yanıl hızı arttırmak, derinliğin toleransını belirgin biçimde düşürür. Fakat Şekil 7' de görüldüğü gibi kritik noktanın üstündeki artışlar, toleransı fazla düşürmez. Yukarıda belirtilen konuların ışığında uygun kesme oranları sağlayan bir kontrol ünitesiyle hassas kontrol edilmiş frezeleme işlemi gerçekleşir. Üretim uygulamaları için malzeme işleme hızı, genellikle çok önemlidir. Aşındırıcı kütle akışı en hayati parametreler den olduğu gibi, aynı zamanda bir optimizasyon konusudur (Hashish, 1993 – Ohlsson, 1995)



Şekil 6. AWJ çapının işleme hızı bağıntısı ve toleransı (Ohlsson, 1995)



Şekil 7. İşleme hızı ve delik toleransı bağıntısı (Ohlsson, 1995)

200 MPa basınca kadar ve maksimum işleme hızında aşındırıcı/su oranı 0,30-0,35 olduğunda maksimum toleranslar elde edilir. Daha yüksek basınçlarda oran 0,5'e doğru kayar. Yüksek yanal hızla yapılan frezelemede talaş kaldırma oranı 0,100 – 0,125 olarak önerilir (Ohlsson, 1995).

2.4. AWJ ile frezelemede sorunlar

Frezeleme işlemi diğer AWJ ile işleme tekniklerine göre yüzey pürüzlülüğü ve geometrisi düzensizliklere daha duyarlıdır. Pek çok problem, AWJ ile işleme sistemi parçalarının tasarımından kaynaklanmaktadır. Sıvının sıkıştırılması, basınç değişimlerinin etkisini artırarak basıncı düzensizleştirir, karıştırma işlemi oldukça karmaşıktır. Aşındırıcı beslemesi düzenli değildir ve aşındırıcı özellikleri, çevredeki nem vb. tarafından etkilenir. Karıştırma işleminde aşındırıcı parçacıklar, öbekler oluşturur ve yüzey kalitesini etkiler. Bu problem, düzenli bir kütle akışı ve iyileştirilmiş karıştırma koşullarıyla giderilebilir. En önemlisi, aşındırıcı kütle akışının sürekliliğidir. Örneğin kompozitlerin frezelenmesinde aşındırıcı akışındaki kesinti tabaka ayrışmasına neden olabilir. Bunun nedeni, grafit-epoksit kompozit'ini kesme yeteneği olmayan saf su jetinin uygulandığı basınçla tabakalarına ayırmasıdır (Hashish, 1993).

Başka bir problem de; akımın anlık artışıyla tüp içerisinde aşağı yukarı hareket eden bir basınç dalgası oluşmasıdır. Bunun sonucunda basınç düzensizlikleri ortaya çıkar ve hidrolik güç etkilenir. Anlık basınç düşmesi, dip yüzeyinin yükselmesine neden olur. Bununla birlikte geçici basınçlar, genellikle bir saniyeden fazla sürmez (Öjmertz, 1997-Ohlsson, 1995).

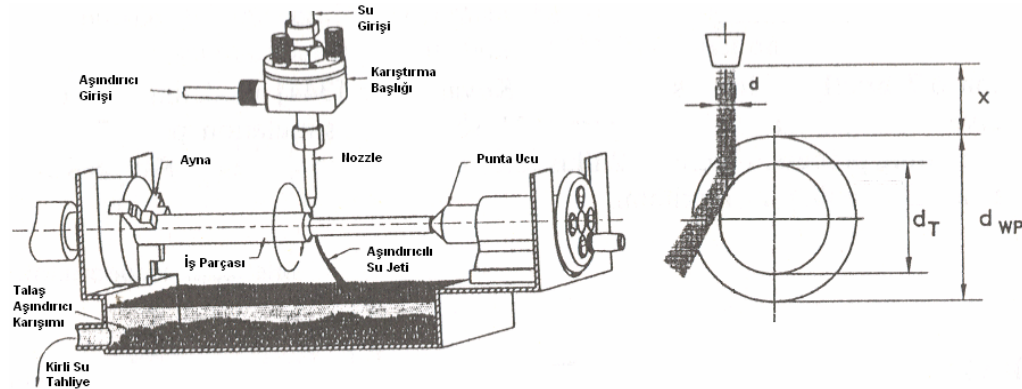
2.5. Frezeleme stratejisi

Düzgün yüzeyler ve dar tolerans aralıkları elde etmek için öncelikle düşük yüzey dalgalığı ve işleme hızında aşırı olmayan düzensizlikler sağlayacak bir strateji gerekir. Frezeleme işleminin bir aşamasında kötü bir tolerans elde edildiye sonraki işlemlerle yüzeyi düzeltmek çok zor olacaktır. İyi bir işleme düzeninde frezelenen oluk; ince ve yumuşak aşındırıcıları, düşük basınçlı bir jet ve yüksek kütle akışı kullanılarak elde edilen kesme gücüyle gösterebilir (Öjmertz, 1997).

3. Tornalama

AWJ tornalama: Düz yüzeylerde yapılan kesme ve frezeleme işlemleri gibi, dönmekte olan iş parçalarına aşındırıcı su jeti uygulanabilir. Bu durumda jet, torna kalemi şeklinde davranır. Bununla birlikte aşındırıcı su jeti ile geleneksel torna kalemi arasında temel bir fark vardır. jet, iş parçasının yüzeyi aracılığıyla yansıtılmakta malzemenin talaş alma miktarını etkiler (Hashish, 1987). Çok sert alaşımlar, seramikler ve karmaşık metal kompozitleri gibi kesilmesi zor metallere döner simetriklerin üretimini kolaylaştırabilir. İşleme; jetin, bir x-y-z modelinde sürekli kaydırılması sırasında çalışılan parçanın döndürülmesiyle gerçekleştirilir. Sistem Şekil 8'de gösterilmiştir. AWJ tornalamasının önemli bir avantajı, işlenmesi zor malzemelerden yapılan hassas millerin (çubukların) çok küçük çaplara kadar işlenmesine olanak tanıyan zayıf kesme kuvvetleridir. Gerilme deneyleri, AWJ ile işlenmiş millerde, malzemenin gerilme karakteristiğinde değişiklik olmadığını göstermiştir. AWJ tornalamasının (sistem hatalarının tutarlılığından ve tornalama işleminin tekrarlanabilirliğinden dolayı) tekrarlanabilir olması; toleransı 0.025 mm'de tutar (Hashish, 1987 – Powell, 1995).

Parametrik optimizasyon: Frezelemede olduğu gibi tornalamada da işlem sonuçları; su basıncı, aşındırıcı akış miktarı, yanal hız oranı gibi işleme parametrelerinin kararlılığına bağlıdır. Genellikle yanal ilerleme hızını arttırmanın, yüzey dalgalılığını arttırdığı gözlenmiştir (Hashish, 1987).



Şekil 8. AWJ ile tornalama işlemi (Hashish, 1997)

Bu parametrelerden ;

Su basıncı: Yüksek su basıncı genellikle daha düzgün yüzeyler ve yüksek işleme hızları sağlar. Fakat yüzey dalgalarının yanal hız oranı, aşındırıcı akışındaki düzensizliklere duyarlılığı kritik hâle gelir.

Aşındırıcı kütle akışı: Aşındırıcı kütle akışını arttırmak, jetin kesme veriminin azalmaya başladığı bir noktaya kadar yüzey dalgalılığını azaltır. Bu da aşındırıcı kütle akışında optimum bir değerinin var olduğunu gösterir.

Dönme: Dönme hızı, yüzey dokusunun karakteristiğini etkilemez. Bu durum, saniyede birkaç metre olan yüzey hızını, saniyede 300 - 500 metre olan parçacık hızıyla karşılaştırılarak anlaşılabilir. Dönme hızına oranla dönüş yönü daha önemlidir. Eğer dönen parça yüzeyi, jete doğru dönüyorsa yüzey daha dalgalı olur.

Jet açısı: Eğer jet, kayma yönünde işlenen parçaya doğru eğilirse yüzeyin dalgalılığı artar.

Yanal ilerleme hızı: Yanal ilerleme hızı, diğer parametreler kadar yüzey kalitesini etkilemez (Hashish, 1997-Schwartz 1983)

3.1. Tornalama stratejisi

Yanal ilerleme hareketi olmadan, ek kesme geçişleriyle yapılan tesviye denemeleri, yüzey kalitesi bakımından iyi sonuç vermiştir. Bu durumda oluşmuş olan yüzey dalgalılığını sonraki işlemlerle giderilmesi mümkün olmayabileceğinden yüzey dalgalılığının azaltacak parametrelerin kontrolünü sağlayacak bir strateji geliştirmek ilk kuraldır. Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için bitirme işleminde aşağıdaki uygulamalara başvurulabilir:

Yanal hareketsiz çok geçişli düzeltme,

Daha ince aşındırıcı kullanmak,

Daha yumuşak aşındırıcı kullanmak,

Bulamaç halinde aşındırıcı kullanmak (Kovacevic, 1995)

4. Delme

Delik açmada iki değişik yöntem uygulanmaktadır. Eğer açılacak delik çapı, aşındırıcı su jetinin çap ölçüleri içindeyse, iş parçası üzerinde herhangi bir hareket olmaksızın açma kapama (jetin) yapılarak delik açılır. Bu işlem, 0,6mm' den daha küçük çaplardaki deliklerin açılmasını sağlar. Eğer açılacak deliğin çapı, jet çapını aşıyorsa, matkap deliğinin daha önce anlatılan şekilde delinmesinden sonra bir daire kesilerek deliğin üretilmesi gerçekleştirilebilir. Malzemenin gevrekliğine bağlı olarak delme basıncının değiştirilmesi zorunludur. Özellikle delme işleminin başlangıcında doğru basıncın seçilmesi büyük önem taşımaktadır. Yüksek delme basıncı yardımıyla aşırı gerilim (stres) üretilmesi, malzemenin kırılmasına yol açacaktır. Eğer ilk açıklık delinirse, su jeti akıp gidebilir ve basınç seviyesi yükselebilir. Eğer basınç seviyesi doğru saha içersinde korunursa, geleneksel yöntemlerle delinemeyen CFC (kloroflorokarbon) malzemeler bile delinebilir (Öjmertz, 1994) Yapılan bir araştırma sonucunda; aşındırıcı su jetleri, çapı 0,6 mm' ye kadar inen yüzeye 25° açı yapan delikleri açmak için kullanılabilir. Böyle bir iş, 0.1 mm çaplı nozul ve 0.35 mm karıştırma tüpüyle yapılmıştır. Ticari olarak bulunan nozullarla 0.76 mm' ye kadar deliklerin açılacağı G. E. Aircraft Mühendislik için yapılan deneylerle desteklenmiştir. Aynı deney AWJ ile delmenin, seramik kaplı jet motoru parçalarındaki soğutma kanallarının açılmasında kullanılabileceğini de göstermiştir. Ayrıca bu teknik, lazere tercih edilmiştir (Kovacevic, 1995) Aşındırıcı su jetiyle iş parçasını delme aşamaları Şekil 9.'da görülmektedir (Hashish, 1991).

AWJ ile oluşturulan delik kalitesi ve ölçüsü;

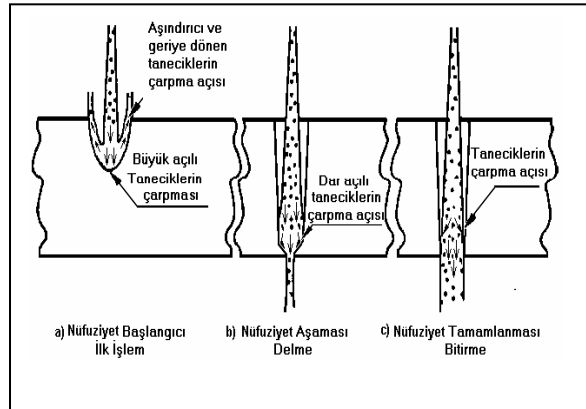
Aşındırıcı besleme işlemine

Delme sırasında basıncın artırılmasına

Delik açıldıktan sonra işleme devam etme süresi

gibi faktörlere bağlıdır.

Kırılgan maddeleri delerken kırılmayı önlemek için 70 – 100 MPa arasında düşük basınçlar kullanılmalıdır. Kırılgan malzemeler için aşındırıcı besleme hattı kısa tutularak başlangıçta aşındırıcının geç gelmesiyle oluşacak kırılma önlenmelidir. Ayrıca aşındırıcı beslemesindeki bir düzensizlik, yarattığı şok dalgalarıyla kırılmalara neden olabilir. Eğer iş, kaplamalı metal ise kırılğan seramik kaplama geçildikten sonra basınç artırılarak daha yüksek performans sağlanabilir. Bu manevra, işin kalitesini de artırır. Çünkü düşük basınçlarda aşındırıcı beslemesinde kesikler olabilir. Düşük basınçlarda aşındırıcının düzenli akışını sağlamak için bir yol da karıştırma düzeneğine eklenen bir vakum pompasıyla emiş gücünün artırılmasıdır. Delik açıldıktan sonra jetin aynı yerde tutulma süresi, deliğin geometrisinin değişmesine neden olur. Değişiklik hem deliğin çapında hem de silindirik yapısında olur (Labus, 1991).



Şekil 9. Aşındırıcı su jetiyle iş parçasını delme aşamaları (Hashish, 1991).

5. Materyal ve Metot

5.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda endüstride en yaygın kullanıma sahip malzemeler seçilmiş ve bu malzemelerin kimyasal bileşimleri

Çizelge 1'de ve Aşındırıcı su jeti kesme tezgâhı ve basınç ünitesi teknik bilgileri Çizelge 2. verilmiştir

Çizelge 1. Kesilen malzemelerin kimyasal bileşimleri

Pirinç -353 ($\alpha + \beta$ Pirinci)

S	Pb	Zn	P	Mn	Fe	Si
0.831	2.21	36.37	0.216	0.0778	0.293	0.0829
Al	Bi	S	Sb	Cu	Ni	
0.442	0.00391	<0.001	<0.002	<59.23	0.237	

% 99 Saflıkta Ticari Saf Alüminyum

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni
0.340	0.509	0.151	0.701	\approx 1.17	0.0044	0.0078
S	Ti	Sb	Pb	Al	Cr	
<0.005	0.063	<0.0625	0.00685	98.94	0.012	

Al 6061 - Alüminyum Alaşımı

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni
0.185	0.278	0.0192	0.290	2.57	0.0943	0.0111
S	Ti	Sb	Pb	Al	Cr	
<0.005	0.0196	<0.003	0.0323	96.60	0.0150	

AISI 304 Paslanmaz Çelik

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.0476	0.498	0.979	0.0338	0.0075	17.30	0.217
Al	Co	Cu	Nb	Ni	V	Fe
0.0248	0.147	0.228	0.0210	8.06	0.116	72.30

Ç 1030 Düşük Karbonlu Çelik (İmalat Çeliği)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.285	0.190	0.722	0.016	0.0332	0.0851	0.012	0.124
Cu	Nb	Ti	Al	W	Pb	Sb	Fe
0.447	0.0034	0.0017	0.007	0.0085	<0.002	0.006	<98.19

D3 Soğuk İş Takım Çeliği (Kalıp Çeliği)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1.93	0.213	0.231	0.022	<0.001	11.31	0.101
Al	Co	Cu	Ni	V	W	Fe
0.0163	0.0177	0.118	0.175	0.109	0.0831	<85.66

Çizelge 2. Aşındırıcılı su jeti kesme tezgâhı ve basınç ünitesi teknik bilgileri

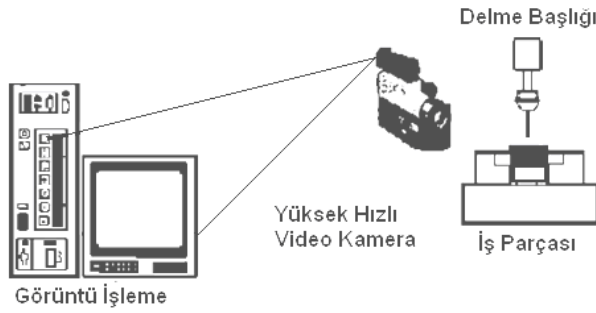
Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesme Tezgâhı ve Basınç Ünitesi			
Kontrol sistemi	BOSCH CNC yazılımı, CAD dosyalarının transferi şeklinde bilgisayar üzerinden kontrol ve kumanda gerçekleştirilerek çalışmaktadır.		
Tahrik Sistemi	AC Servo motor		
İlerleme (yanal) hızı aralığı	0-6000 mm/dak		
Cihazın çalışma sahası	x, y, z eksenleri sırasıyla 1250 X 2500 X 200 mm		
Üç eksen de ilerleme hızı	7000 mm/dak		
Doğrusal ve Dairesel hareket hassasiyeti	0.01mm, 0.1°		
Sistemde kullanılan pompa	SL 75HP Yüksek basınç pompası, yükseltici tipindedir		
Pompa piston çapı	20 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	2.5 – 5 l/dak		
Suyun basınç yükselticiye giriş basıncı	6 bar		
Suyun basınç yükselticiden çıkış basıncı	20 bar		
Sistemde kullanılan suyun çalışma sıcaklığı	min: 0°C mak: 60 °C çalışma sıcaklığı		
Yükseltici çalışma basıncı	200 bar	Suyun nozula giriş çapı	0.25 mm
Aşındırıcılı suyun nozuldaki çıkış çapı	1.00 mm	Aşındırıcının nozula giriş çapı	0.75 mm
Suyun debisi	3 l/dak	Nozul uç malzemesi	Safir
Suyun nozuldaki çıkış hızı	800 m/s	Suyun çıkış anındaki basıncı	≈ 4000 MPa
Su tüketimi	3 l/dak	Kesme anında oluşan ısı	55 °C
Çalışma anında çektiği akım	380 V	Tüketilen enerji	58 kwh
Tüketilen aşındırıcı miktarı	250 g/dak	Kullanılan aşındırıcı	GMA Garnet

5.2. Metot

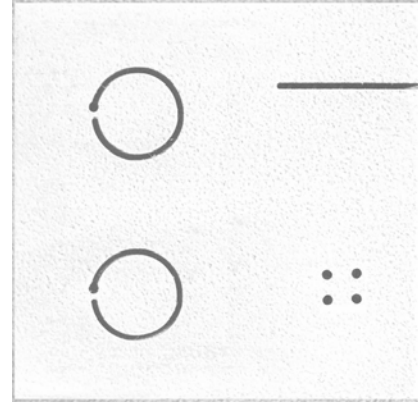
Bu çalışmada, malzeme ve malzeme kalınlıklarına göre kesme ve delme zamanının araştırılması esas alındığından aşındırıcılı su jeti sisteminin bilinen bütün parametreleri

- Hidrolik parametreler; Pompa basıncı, su-orifis çapı, su debisi
- Aşındırıcı parametreleri; Kütleli debisi, parçacık çapı, parçacık boyut dağılımı, parçacık biçimi, parçacık sertliği, yeniden kullanılabilme kapasitesi, aşındırıcı şartları (kuru-yaş)
- Karıştırma ve ivmelendirme parametreleri; Odaklama çapı veya karıştırma borusu çapı, odaklama boyutu veya karıştırma borusunun uzunluğu
- İşleme parametreleri

Yanal hız, paso (geçiş) sayısı, durma (stand-off) mesafesi, darbe (kesme) açısı, sabit tutulmuştur. Hedeflenen çalışmayı gerçekleştirmek için, Şekil 10'de ki deney düzeneğinde Şekil 11' de ki parça uygulama sonrası elde edilmiş olup, doğrusal ve dairesel kesme işlemlerinin dışında delme uygulamaları yapılmıştır. Aşındırıcılı su jetinin hedef malzeme üzerine çarpması, kesme ve delme işlemlerinin tamamlanması sonrası malzemeden çıkış anını tespit etmek amacı ile kamera görüntüleri çekilmiş olup, görüntüler her malzeme ve her kalınlık için dört kez işlem yapılarak her bir işlemin kamera görüntüleri incelenerek delme zamanları tespit edilmiş, bulunan zamanların aritmetik ortalamaları alınarak ortalama delme süreler bulunmuştur. Delinen yüzeylerin sertlikleri "INSTRON WOLPERT TESTOR" sertlik ölçme cihazında "HV 30" değeri ile ölçülmüştür, her yüzey ve deliğin beş değişik noktasında yapılan ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak sertlik değerleri bulunmuştur. Elde edilen sertlik değişimleri Çizelge 3. de verilmiştir.



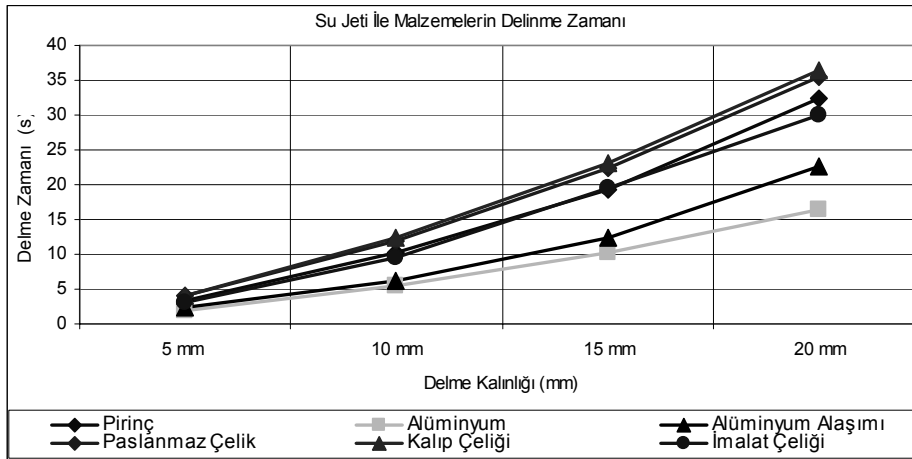
Şekil 10. Deney düzeneği



Şekil 11. Uygulama parçası

6. Sonuç ve Tartışma

% 99 saflıkta ticari saf Alüminyum, Al-6061 Alüminyum alaşımı, Pirinç-353, AISI 304 östenit paslanmaz çelik, Ç 1030 düşük karbonlu imalat çeliği, D3 soğuk iş takım çeliği (kalıp çeliği) malzemelerden hazırlanan 5, 10, 15 ve 20mm kalınlığındaki numuneler işleme parametreleri sabit tutularak delinmiştir. Elde edilen sonuçlar grafiksel olarak Şekil 12 de görülmektedir.



Şekil 12. Aşındırıcılı su jeti ile delinen malzemelerin grafiksel olarak karşılaştırılması

Çalışmanın sonucunda ortaya çıkan grafikler incelendiğinde aşındırıcılı su jeti ile delme işlemlerinde; saf alüminyum diğer malzemelere göre çok kısa sürede delindiği, buna karşın D3 tipi kalıp çeliğinin ise bunun tam tersi olarak en uzun sürede delindiği tespit edilmiştir. İlk 5mm kalınlığındaki bütün malzemeler sonrasındaki 10mm ve diğer kalınlıklara oranla çok daha kısa zamanda delindiği halde diğer kalınlıklar yaklaşık 2,5-3 katı kadar daha fazla zamanda delinmişlerdir. Tüm malzemelerde kalınlığının artması ile delme sürelerinin artmasının sebebi; kesme aşınma bölgesinden deformasyon aşınma bölgesine geçiş sonucu basıncını yitiren su jeti ve keskin kenarlarını kaybeden yani körelen aşındırıcının daha uzun sürede işlem yapmasıdır. Bu gecikmenin ortadan kaldırılabilmesi için jetin basıncını delme sırasında artırılması ve jet içindeki aşındırıcı oranının artırılması delme işleminin daha kısa sürelerde gerçekleşmesini sağlar.

Çizelge 5. Malzemelerin kesme ve delme öncesi ile sonrası sertlik değişimleri

SERTLİK (HV)	MALZEMELER, YÜZEY SERTLİK DEĞERLERİ					
	Ticari Alüminyum	Saf Al 6061 Alüm. Alaş	Pirinç - 353	Ç Düş.Kar.İm.Çel. 1030	D3 Soğuk İş Tak. Çel.	AISI 304 Öst.Pas. Çel.
ÇEKİRDEK	41,05	53,8	115,17	172,67	227,5	185,67
DELİK YÜZEY SERTLİĞİ	40,88	53,45	116,50	171,83	228,33	184,50

- Yapılan kesme işlemleri doğrusal ve dairesel işlemler olarak gerçekleştirilmiş, yanal ilerleme hızı, jet hızı, kesme basıncı ve aşındırıcı oranları sabit tutulduğunda kesme işlemi, doğrusal ve dairesel işlemlerde her bir malzemede eşit hızda çıkmıştır (dairese kesmede delik delindikten sonraki kesme işlemi çevre hesaplanarak bulunmuştur).
- İşleme kolaylığı ve her türlü malzemenin deformasyonsuz işlenmesi su ile kesme yöntemlerinin sınırsız bir uygulama alanına sahip olacağına bir göstergesidir.
- Tornalama, frezeleme ve delme uygulamalarında malzeme kalınlığı arttıkça, yüzeydeki dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlüğü artmaktadır. Fakat kesme performansını iyileştirilmesini sağlayan kesme parametreleriyle (optimum parametreler) ile yüzey kalitesinde de iyileşme sağlanmaktadır.
- Aşındırıcılı su jeti ile delme ve kesme işlemlerinde malzeme sertliğinde belirgin bir değişim olmamakta, malzemelerin metalürjik özelliklerinde bir değişiklik olmadığı görülmektedir.
- Kesilen numuneler değerlendirildiğinde, malzeme kalınlığındaki artışa bağlı olarak, yüzeyde eğrisel-çizgisel izler halinde oluşan dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlüğü artmaktadır. Kesilen yüzeylerde, jet hızının temas ettiği ilk yüzeye yakın üst bölgede daha iyi yüzey özellikleri elde edilirken, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak, alt bölgede paralel çizgiler halinde oluşan eğrisel izler şeklinde yüzey özellikleri bozulmaktadır. Bu özellikleri sergileyen AWJ ile kesilmiş bir yüzeyin kalitesi, alt kısımda oluşan bu çizgili ve dalgalı yüzey özelliklerine göre belirlenmelidir.
- Aşındırıcılı su jetiyle işleme yönteminin çok fazla parametre içermesi nedeniyle, bu parametrelerin optimizasyonu önemli olmaktadır. Bu optimizasyonun gerçekleştirilmesi 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 sayıda parametrenin etkilerinin henüz tam olarak anlaşılabilmiş olması sebebiyle, AWJ ile işleme akademik anlamda en çok çalışılan konuların başında yer almaktadır. Akademik çalışma yapacak akademisyenlere su jeti ile işleme gibi ortaya çıkarılmayı bekleyen geleceğin işleme yöntemini araştırmalarını önermekteyiz.

Kaynaklar

1. A. Akkurt, "Çeşitli malzemelerin Aşındırıcı Su Jeti İle Kesilmesinde Yüzey Özellikleri, Sertlik ve Mikro yapı Değişimlerinin Farklı Kesme Yöntemleriyle Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2002).
2. Hashish, M., 1993, "Prediction Models for AWJ Machining Operations", Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, August 28-31 pp 205- 217, Seattle, WA, USA.
3. Hashish, M., "Turning With Abrasive-Waterjets-A First Investigation", ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry, November, 1987, Vol. 109/281 Flow Industries
4. Hashish, M., 1989, "Abrasive Waterjet Machining", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 111. pp 154-162, USA
5. Hashish, M., Whalen, J., 1991, "Precision Drilling of Ceramic Coated Components with Abrasive-Waterjets". International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, FL, June 3-6, USA
6. Schwartz, M. M., "Water Cuts Composite Aircraft Parts", AM –American Machinist, pp. 103–105, Mc Graw-Hill, USA, March 1983.
7. Hashish, M., 1997, "Turning With Abrasive-Waterjets-A First Investigation", ASME Transactions, J. of Eng. for Industry,
8. Kovacevic, R., Mohan, D.L., Zhang, Y.M., 1995, "Cutting Force Dynamics as a Tool for Surface Profile Monitoring in AWJ", Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 340-350,
9. Labus, T. J., 1991, "Industrial Applications", Fluid Jet Technology –Fundamentals and Applications,
10. ISBN 1-880342-01-4, Publ. By the WJTA Louis, MO, USA
11. Momber, W. A., Kovacevic, R., 1998, "Abrasive Waterjet Machining", Springer – Verlag London Limited, ISBN 3540762396 USA
12. Momber, A.W., Kovacevic, R., 1988, "Principles of AWJ Machining", Springer-Verlag London Limited, pp. 284 - 324 UK
13. Ohlsson, L., Powell, J., Magnusson, C., 1994, "Mechanisms of Striation Formation in Abrasive Waterjet Cutting", Proceedings of the 12th. Int. Conf. Or Jet Cutting Technology, pp. 151-164, France
14. Ohlsson, L., "The Theory and Practice of Abrasive Water Jet Cutting", PhD Thesis, Lulea University of Technology, pp, 53-57, 1995, Sweden
15. Öjmertz, C., "A Study On Abrasive Waterjet Milling, Department of Production Engineering". Thessis for Degree of Doctor of Philosophy, March- 1997, Sweden
16. Öjmertz, C., 1994, "Abrasive Waterjet Machining", Chalmers University of Technology MSc Thesis, pp 5-17, Göteborg, Sweden
17. Powell, J., Ohlsson L., Olofsson E. M., 1995, "Optimisation of the piercing or drilling mechanism of Abrasive WaterJets", Lulea University of Technology Division of Materials Processing, S-951, Sweden