

AŞINDIRICILI SU JETİYLE (AWJ) KESMEDE ELDE EDİLEN YÜZEY ÖZELLİKLERİ YAPILAN ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

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

* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü-ANKARA

** Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü
06500 Teknikokullar, ANKARA

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

ÖZET

Kesme uygulamalarında, oksijen kaynağı ile kesmeden su jetine kadar bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bir ileri teknoloji ürünü olan su jeti, bu yöntemlerin en verimli olanıdır. Yeni bir üretim yöntemi olarak aşındırıcılı su jeti (AWJ), işlenmesi güç malzemelerin işlenmesinde etkili bir yöntemdir. Garnet, alüminyum oksit veya silisyum karbür gibi aşındırıcıların yüksek hızlı bir su jetiyle ivmelendirildiği ve bir AWJ nozulu üzerinden işlenecek malzemeye yönlendirildiği bu işleme yöntemi, son zamanlarda kullanıma sunulan güncel işleme metodlarından biridir. Yöntemin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaya başlamasıyla yapılan araştırmalar da bu yöntemle elde edilen yüzey özellikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Mekanik tasarım ve üretimde çok önemli olan yüzey topoğrafyasının karakterizasyonu, pek çok mühendislik alanında giderek daha da önem kazanmaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı, aşındırıcılı su jetiyle elde edilen yüzeylerin yüzey topoğrafyası, yüzey kalitesi ve kesik modeli üzerine odaklanmış çalışmaların bir değerlendirilmesini yapmaktır.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcılı su jeti (AWJ) ile işleme, yüzey topoğrafyası, yüzey kalitesi, kesik modeli (geometrisi)

SURFACE CHARACTERISTICS ATTAINED IN ABRASIVE WATER JET (AWJ) CUTTING – A BRIEF EVALUATION OF PREVIOUS STUDIES

ABSTRACT

In the cutting applications, several methods are being used varying from flame cutting to waterjet. Amongst these, the waterjet which is the product of advanced technology is the most effective one. As a new manufacturing process, abrasive water jet (AWJ) machining has been very effective in machining difficult-to-machine materials. This cutting technique is one of the most recently introduced machining methods in which an abrasive such as garnet, aluminum oxide or silicon carbide is accelerated by a thin stream of high velocity waterjet and directed through an AWJ nozzle towards the target material to be machined. The studies also have been concentrated on surface characteristics generated by this process become widespreadly in industrial applications surface topography is crucial to mechanical design and manufacturing and characterization of surface topography has become increasingly important in many engineering fields. For this reason, the aim of this paper, to make an evaluation of studies focused on surface topography, surface quality and kerf model of abrasive waterjet generated surfaces.

Key Words : Abrasive Water Jet (AWJ) Machining (Cutting), Surface Topography, Surface Quality, Kerf Model (Geometry)

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiye paralel olarak imalat teknolojisi de hızlı bir değişim sürecinde olup “üretimde kalite ve ekonomi” ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda imalatta mümkün olan bütün seçenekleri ve üretim aracı olan her türlü malzemeyi kullanarak amaca ulaşma çabası söz konusudur. Metalurjik ve mekanik özellikler göz önünde bulundurulduğunda, kullanılan malzemelerin çeşitliliği, değişik işleme metodlarının kullanılmasını gerektirmektedir. Ne var ki her malzemeye göre bir işleme metodu veya mevcut işleme imkânlarına göre üretimde kullanılacak malzemenin belirlenmesi, üretimdeki kaliteyi olumsuz etkilemektedir. İşleme metoduna bağlı olarak, işlenen yüzey ve çevresindeki bölgelerde meydana gelecek yapısal bozulmalar, üretim kalite-

tesini ve işleme ekonomisini etkileyen bir başka faktördür. Bu sebeple, bir bütünü oluşturan malzeme ve işlenmesinde kullanılan imalat yöntemi, günümüzdeki araştırmaların temel konusu olmuştur ve olmaya da devam edecektir (1, 2, 3). Günümüzde kesme işlemlerinde lâzerden yüksek basınçlı su jetine kadar, çok geniş bir yelpazeyi içine alan metodlar kullanılmaktadır. Bu metodların büyük bir çoğunluğu bilinmekle beraber, henüz çok yaygın olarak bilinmeyen, ileri teknoloji ürünü, su jetiyle kesme sistemi; kalkınmış ülkelerde endüstrinin her dalında uygulanmaktadır (2). Malzemelerin su jetiyle kesilmesi uzun yıllardır bilinmesine rağmen, su ile kesilebilen malzemelerdeki artış, tekniğin güvenilirliğindeki gelişmeler ve verimdeki artış ile tatmin edici sonuçların alınmasından sonra bu teknik de, özellikle son birkaç yıl içinde endüstriyel üretimde kullanılır hâle gelmiştir.

Kesilen malzemede herhangi bir hasar oluşmaması bilgisayar kontrollü robotlarla kullanılabilmesi ve hareket kabiliyetinin yüksek olması sebebiyle, hassasiyet gerektiren kesme işlemlerinde suyla kesme metodunun rahatlıkla kullanılabilmesini sağlamaktadır (3).

Kesici malzeme olarak su kullanılması, metodun yanıcı ortamlarda kullanılabilmesine imkân sağlamaktadır. Tünel inşaatları ve maden ocaklarındaki galerilerde matkap ucu olarak kullanılması, verimliliği artırmaktadır (4,5). Ayrıca, lâstik/plâstik kaplanmış çeliklerde ve katlı kompozit malzemelerde, katmanların ergime ve yanma sıcaklıklarının farklı olmasından dolayı sorunsuz bir işleme için su jeti kullanılabilir tek yöntem olarak görülmektedir. İşleme sırasında zehirli gaz, toz, talaş veya kimyasal kirlilik oluşmaması sebebiyle asbest, tuğla, plâstik, deri, kumaş, kâğıt, patlayıcı ve yanıcı maddeler vb. malzemelerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (6-9). Kesme işleminin su ile gerçekleştirilmesi, gıda sektöründe (yiyeceklerin kesilmesi için) ihtiyaç duyulan hijyenik şartlara, tam anlamıyla uygunluk sağlar (6,10-14). Gıda ve tekstil sektörü, sistemin etkili kullanılabilmesi için diğer endüstriyel alanlardır.

Olgunlaşma sürecini tamamlayarak artık deneysel bir talaş kaldırma yönteminden ziyade alternatif bir işleme tekniği hüviyetine bürünen bu teknik için, bir takım tezgâhı olarak özel işleme şartlarının, elde edilebilir toleransların, yüzey kalitesinin, elverişli geometrilerin, sürece uygun malzemelerin ve maliyet faktörlerinin araştırılması gündeme gelmiştir (15).

2. TEMEL PRENSİPLER VE AWJ İLE İŞLEMEDE ELDE EDİLEN YÜZEY ÖZELLİKLERİ

Tipik bir su jeti sistemi 4000 bar (400 MPa)'lık bir basınçla çalışır ve su 0,1 mm çapındaki bir delikten yaklaşık 900 m/sn (yaklaşık Mach 3 seviyesinde) hızla, ince bir su jeti hüzmesi hâlinde çıkar (2, 16). Teknoloji, kullanılan özel donanımla su basıncının 4000 bar gibi çok yüksek bir basınca çıkarılması ve nozuldan geçirilerek kesilecek parça üzerine odaklanması esasına dayanmaktadır. Bu yüksek basıncın sahip olduğu potansiyel enerji, sistem tarafından kinetik enerjiye dönüştürülür. Su hüzmesi, kesilecek parça üzerine 650 m/sn gibi bir hızla (ses hızının iki katı) püskürtülür. 0,1 mm gibi çok küçük bir noktaya odaklanan

su hüzmesi, bir kesme hamlacının alevi gibi etki yapar (17). Erişilen yüksek hızdan dolayı su moleküllerinin iş parçası malzemesine çarpması, çok ani olmakta ve malzeme moleküllerinin yavaş hareketi, bu sınırlı sürede malzeme yapısı ve özelliklerinde bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Moleküllerin titreşim ve rezonanslarının sabit kalması sebebiyle yüzey kalitesi yüksek bir işleme yüzeyi elde edilmektedir. Aşındırıcı su jeti sistemlerinde, aşındırıcı taneciklerin yüksek basınçlı su ile beraber püskürtülmesi esastır. Bu yöntem, özellikle kesilmesi güç sert malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır

Kesme teorisi, kesme aşınması ve deformasyon aşınmasıyla ilişkilidir. Kesme derinliği, belirli bir basınçtan sonra lineer olarak değişmektedir (18). Yüzey dalgalanmaları, basınçla ters orantılıdır. Uygulama yerine göre optimum çalışma basıncı değişmektedir.

Kesme yöntemlerindeki işleme kalitesi genel olarak malzeme özelliklerindeki değişim, oluşan yüzeyin topoğrafyası ve kesilen kanalın geometrisi ile karakterize edilmektedir. Su jetiyle şekillendirme teknolojisi, makine imalat sektörü başta olmak üzere, endüstrinin farklı alanlarında giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Makine imalatında; doğrusal kesme, boşaltma, tornalama, frezeleme vb. işlemlere alternatif olarak kullanılmaktadır (19).

Diğer uygulama alanlarıyla kıyaslandığında, makine imalatında daha yüksek hassasiyet ve daha temiz yüzey kalitesi istenmektedir. Oysa su jetinin kullanıldığı maden ve inşaat sektöründe (20), bu özelliklerde aşırı hassasiyet beklenmez. Kesilen yüzeyde paralel hatlar şeklinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğündeki asıl neden veya nedenler henüz tam olarak izah edilememektedir. Jet hızının yüksek olması ve iki (veya üç) fazlı türbülans akışın karmaşıklığı, bu nedenlerin araştırılmasını güçleştirmektedir (21, 22).

2.1. Yüzey Özelliklerini Belirleyen Mekanizmalar

Aşındırıcı su jetiyle kesme uygulamaları yaygınlaştıkça, yapılan araştırmalar bu kesme işlemiyle elde edilen yüzey kalitesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Su jetiyle talaş kaldırma, su jetine katılan aşındırıcı taneciklerin çarpma etkisinin meydana getirdiği erozyon (aşınma) mekanizması ile oluşmaktadır (22, 23). Aşındırıcı su jetiyle kesi-

len yüzeylerde, birbirine paralel çizgilerden oluşan bir yüzey pürüzlüğü elde edilmektedir (21-25).

Sünek malzemelerle yapılan çalışmalar, talaş kaldırmayı sağlayan erozyonun, “kesme-aşınma” mekanizması ve “deformasyon-aşınma mekanizması”ndan oluştuğunu göstermiştir. Kesilerek elde edilen yüzey, bu iki mekanizmaya bağlı olarak iki farklı yüzey özelliği göstermektedir:

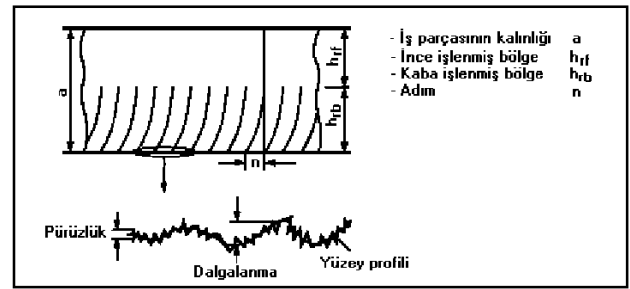
- i) Kesme-aşınma mekanizmasında, aşındırıcı tanecikler yüzeye küçük açılarla çarpmakta ve nispeten daha düzgün yüzeyler elde edilmektedir.
- ii) Derinlikteki artışla birlikte deformasyon – aşınma mekanizması etkili olmakta ve buna bağlı olarak yüzeyde dalgalanmalar oluşmaktadır

Yüzeydeki bu iki farklı özellik, lâzer, plazma ve aşındırıcı su jetiyle kesme gibi bir jet hüzmesi kullanılarak kesme işlemi yapan yöntemlerin hepsinde söz konusu olmaktadır. Bu işlemlerde hüzmenin ihtiva ettiği enerjinin büyük bir bölümünü kaybettiği bir bölgede daha düzgün yüzeyler elde edilirken bir sonraki aşamada hüzme sapmakta ve malzemeye çarpma açısı büyümektedir. Su jetiyle sünek malzemelerin işlenmesinde bu değişim süreci malzemedeki atomik sınırların kesilmesinden, deformasyon aşınmasına dönüşüm şeklindedir. Daha kalın malzemelerin kesilmesinde de bu “deformasyon-aşınma” mekanizması etkili olmakla beraber kesilen malzeme kalınlığının artmasıyla, jet hüzmesindeki bozulmalar, düzenli ve sürekli kesme işlemi de zorlaştırmaktadır (13).

Kalın malzemelerin kesilmesinde, kesme işleminin kesintiye uğraması ve derinliğe bağlı olarak kaldırılan talaş miktarındaki değişim, yüzeydeki dalgalanmaların temel sebebidir. Malzeme kalınlığı arttıkça, yüzeydeki dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlüğü artmaktadır. Jet hüzmesindeki sapmalara bağlı olarak oluşan yüzeydeki bu dalgalanmalar, sünek veya gevrek tüm malzemelerde görülmekte ve malzeme kalınlığına bağlı olarak da artmaktadır. Yapılan araştırmalar, bu problemi elimine etmek için kesme aşınma mekanizmasının etkili olduğu bölgenin genişletilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bunun sağlanması için de ilerleme hızının azaltılması veya jet hüzmesine katılan aşındırıcı miktarının artırılması gibi farklı kesme parametre-

lerinin düzenlenmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır (24, 25).

AWJ ile kesmenin en özel avantajı, özellikle metalürjik ve ısıl etkenlerden etkilenmemesidir (26-28). AWJ ile kesmede belli şartlar altında oluşan kanalın geometrisi, karakteristik bir kriter olduğundan bu durum uygun işleme şartları vasıtasıyla azaltılabilir veya optimize edilebilir (29). AWJ ile kesilen bir yüzeyin kesme yönteminin fiziksel yapısından kaynaklanan topoğrafyası, Şekil 1’de karakterize edilmiştir. Pek çok araştırmacı, bu yüzey yapısını analiz etmek ve tanımlamak için çalışmalarda bulunmuşlardır.



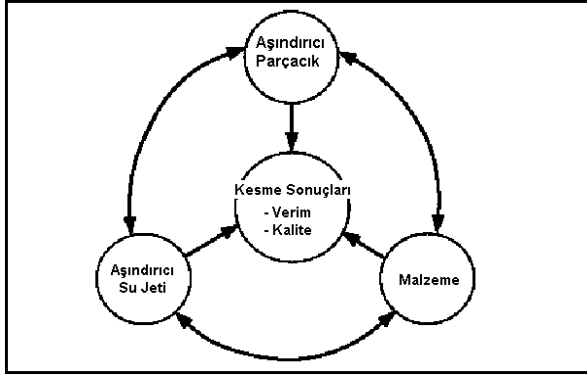
Şekil 1. Kesilen yüzeyin genel özellikleri (29)

Blickwedel ve arkadaşlarının (26), Kovaçeviç’ in (30), Singh ve arkadaşlarının (31) deneysel çalışmaları bunlara örnek olarak gösterilebilir. Chao ve arkadaşları (32) ise nozuldaki titreşim ile yüzey profilindeki dalgalanmalar arasındaki ilişkiyi tartışmışlardır. Bazı araştırmacılar ise, deneysel sonuçlara dayalı gözlemsel veriler kullanarak yüzey yapısını tanımlayan “nümerik simülasyon modelleri” üzerinde çalışmışlardır (21, 23, 24, 33).

Yukarıda tanımlandığı gibi, yüzey yapısının oluşum prosesinin tam olarak anlaşılma-mış olması, bazı araştırmacıları kesme kalitesi üzerinde araştırmalara sevk etmiştir. Kesme kalitesini etkileyen iç ve dış etkenler vardır. Nozul veya iş parçasının titreşimi ve kesme parametrelerindeki dalgalanmalar harici etkenler olarak tanımlanabilir. Yöntemin yapısı ise bir iç etkidir (29).

Şekil 2, kesme sonuçlarını etkileyen ana faktörleri göstermektedir. Kesme verimliliği ve kesme kalitesi anlamını taşıyan kesme sonuçları; aşındırıcı tanecikler, hedef (işlenen) malzeme ile kesme sırasındaki üç fazlı jet (hüzme) hidrodinamiği kadar basınç, nozul çapı, aşındırıcı debisi ve odaklama geometrisine bağlı olan AWJ arasındaki

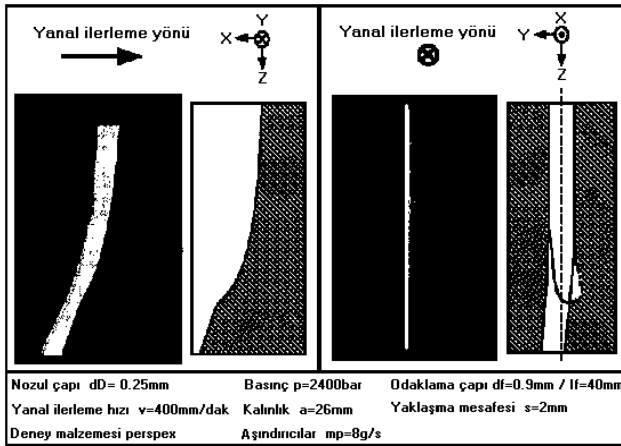
etkileşime bağlı olarak meydana gelmektedir. Bu üç hâkim faktörün her biri, diğerlerini geçici veya bölgesel olarak etkilemektedir.



Şekil 2. Aşındırıcılı su jetiyle kesmede etkileşim şeması (29)

2.2. Jet Hüzmesindeki Eğilme

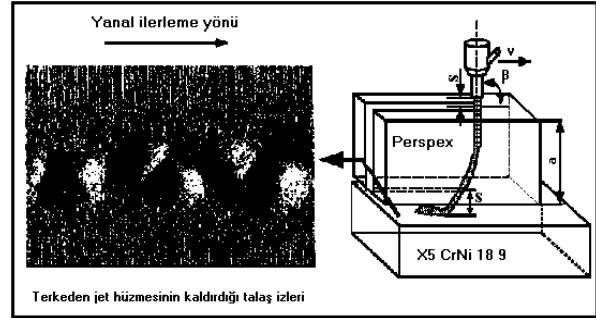
Kesme işleminin kesintiye uğramasıyla "kesme önü" adı verilen bir kenar elde edilir. Bu oluşum, belli bir momentte malzeme ile jet hüzmesi arasındaki etkileşimi gösterir ve kesme işlemi süresince oluşan kademelerin oluşumu ve hareketi (değişimi) hakkında bilgi sağlar (29). Yanal ilerleme yönünde ve ona dik yönde kademe oluşumu ve hareketi, perspex bir malzemede (şeffaf ve kırılğan olmayan bir plâstik malzeme türü) Şekil 3'te görüldüğü gibi görüntülenmiştir. Şekillenen bu kademe, kesme işlemi sırasında jet hüzmesinin orijinal aksenal yönünden bir sapma gösterir. Bu davranış aynı zamanda alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı, çelik ve seramik malzemeler gibi farklı malzemelerde de görüntülenmiştir.



Şekil 3. Kesme sırasında kesme önü kenarında oluşan kademelerin eğimi (29)

2.3. Jet Hüzmesinin Salınımı

Kademelerin hareketini ölçmek için Guo, Louis ve Meier (29) tarafından yapılan deneylerde jet hüzmesi iş parçasını terk ederken, bunun şematik gösterimi, Şekil 4'ün sağ tarafında verilmiştir. İşlenen malzeme, yine farklı kalınlıklardaki perspex'tir. Perspex malzemenin altına, jet hüzmesi perspex malzemeyi terk ettikten sonra yüklenen bir çelik parça yerleştirilmiştir. Çelik malzeme üzerindeki kaldırılan talaş izleri, perspex numunedeki kesigi terk ederken, jet hüzmesinin yoğunluk dağılımını temsil etmektedir. Şekil 4'ün sol tarafında, çelik numuneden kaldırılan talaş izleri gösterilmiştir. Bu izler, işlemin periyodik, süresiz ve üç boyutlu olduğunu göstermekte ve orta hat boyunca oluşan yoğunlukların sürekli olmayan bir hatta dönüşmekte olduğunu kanıtlamaktadır. Bu salınım kararsızdır ve oluşumu Şekil 3'te de gösterildiği gibidir.



Şekil 4. Perspex malzemeyi terk eden jet hüzmesinin çelik malzemeden kaldırdığı talaş izleri (29)

3. AWJ İLE İŞLEMEDE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN TESPİTİ VE NÜMERİK SİMÜLASYONU İÇİN YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kesilen yüzeylerdeki paralel hatların oluşum mekanizması bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Geçmişteki Finnie'nin mikro işleme modeli (34), ve Bitler'in deformasyon-aşınma modeli (35); işleme yönteminin analizi ve AWJ ile işleme modellerinin oluşturulmasında kullanılmıştır (23, 30, 36-40). Belirli şartlar altında, bazı teorik modellerin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gözlenmiştir. Kesilen yüzeyde oluşan pürüzlüğe sebep olarak, kesme yüzünde kesintili ilerlemeden şüphelenilmiş, fotoğraf ve video kayıtlarıyla gözleme dayalı çalışmalar yapılmıştır (26, 36, 40, 41). Son yıllarda sürekli olmayan kesme önü (doğru) çizgisel yüzey oluşumu arasındaki ilişkilere dayalı çalışmalarda bu durum, iki veya üç boyutlu nümerik

simülasyonlarla incelenmiştir (39). Nümerik simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki oldukça yüksek uyum dikkati çekmektedir.

Singh ve arkadaşlarının çalışması (22), kesme işlemindeki pek çok parametreyi birlikte değerlendirmeyi amaçlamıştır. Araştırmacılar; kesme hızı, aşındırıcıların kütleli debisi, orifis çapı, aşındırıcı odaklama lülesi çapı, aşındırıcı boyutu, aşındırıcı karıştırma haznesinin büyüklüğü ve su basıncı parametrelerini ele alarak deneylerini alüminyum, yumuşak çelik, cam ve kauçuk malzemeler üzerinde gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneylerle, farklı parametrelerle gerçekleştirilen kesme işlemlerinde parça kalınlığının yüzey kalitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla 12,7 mm (0.5 inch) ile 25.4 mm (1 inch) arasında değişen parça kalınlıkları seçilmiştir. AWJ ile kesilen yüzeylerin pürüzlülük değeri, temassız ölçüm yapabilen optik lâzer cihazı (Rodenstock-Model RM600) ile ölçülmüş ve elde edilen veriler, bir bilgisayar yazılımıyla analiz edilerek grafiklere dönüştürülmüştür.

Deney parametreleri, pratik uygulamalardaki parametrelere uygun seçilmiştir. Meydana gelebilecek muhtemel hataları önlemek için her deneyde aynı orifis ve aynı odaklama lülesi kullanılmıştır. Deneyler sırasında değiştirilen parametreler ve uygulanan değerleri, Çizelge 1’de gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan aşındırıcı malzemesi, “Barton Garnet” olarak seçilmiştir. Deneyler sırasında parametrelerden biri değiştirilirken diğerleri sabit tutulmuştur.

Çizelge 1. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri (22).

Parametreler	Uygulanan Değerler
Su Basıncı	172 – 207 – 276 – 345MPa
Orifis Çapı	0.18 – 0.25 – 0.3 – 0.36mm
Odaklama Lülesi Çapı	0.56 – 0.76 – 1.1mm
Aşındırıcı (Garnet) Büyüklüğü	80 – 120 – 220 mesh
Kesme Hızı	25 – 63.5 – 127 – 191 – 254min
Kütleli Aşındırıcı Debisi	227 – 340 – 454 – 567 – 680 g/min
Malzemeler	Alüminyum (T6061 – T6511) Yumuşak Çelik, Cam, Kauçuk

Deney sonuçlarını su basıncının, safir orifis çapının, odaklama lülesi çapının, aşındırıcı tanecik boyutunun, kesme hızının kütleli aşındırıcı debisinin ve malzeme türünün etkileri açısından

ayrı ayrı değerlendiren araştırmacılar, aşağıdaki sonuçları elde etmişlerdir:

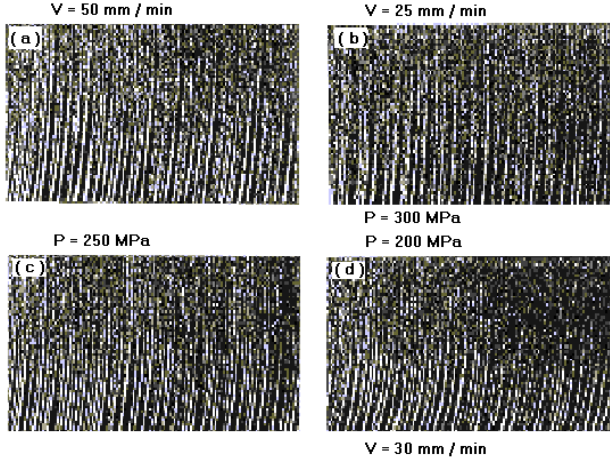
- Kesme performansının iyileşmesini sağlayan parametreler, aynı zamanda kesme aşınma bölgesinin de gelişmesini sağlamaktadır.
- Kesilen bölgenin alt kısmındaki yüzeyde oluşan dalgalı yüzey (paralel çizgiler hâlinde oluşur), işlenen yüzeyin yüzey kalitesini tayin etmektedir.
- Kesme-aşınma bölgesinde elde edilen daha iyi yüzey kalitesi, her zaman deformasyon-aşınma bölgesinden daha iyi yüzey elde edilebileceğini garanti etmez.
- Kesme parametrelerinin optimizasyonu ile yüzey kalitesi iyileştirilebilir.
- Her iki aşınma mekanizması ile oluşan bölgelerdeki yüzey kalitesinde artış daha düşük kesme hızları ile elde edilmektedir.

Denenen malzemelerin özellikleri farklı olmakla beraber hepsinde aynı yüzey topoğrafyası elde edilmiştir (22). Niu, Fukunishi ve Sawamura (21), bu deneysel ve nümerik simülasyon araştırma sonuçlarını kesme hassasiyeti ve çizgisel pürüzlüğün kontrolüyle iyileştirilmesi için bir metod geliştirmek amacıyla kullanmışlardır. Metodun geliştirilmesindeki deneyler; nozul yanal hareket hızı, nozul boşaltma basıncı, nozul açısı, aşındırıcı debisi vb. gibi parametrelerin çeşitli kombinasyonlarıyla yapılmıştır. Şekil 5’te deneysel çalışmalardan elde edilmiş yüzeylerin mikro fotoğrafları, Şekil 6’da ise simülasyonla elde edilmiş farklı yanal hızlar için yüzey modelleri görülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

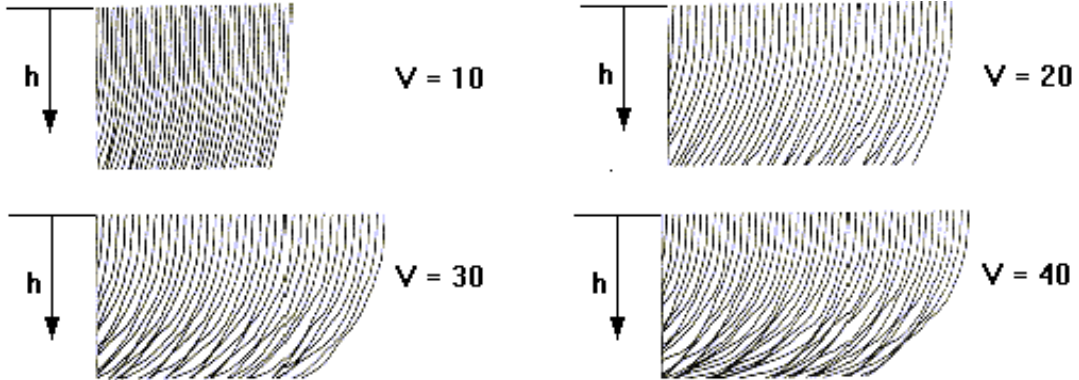
- Deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular, daha düşük boşaltım basıncının çizgisel pürüzlüğü azalttığını ve kesme hassasiyetini artırdığını göstermiştir. Nozul yanal hızının etkisi çok küçük olurken daha büyük nozul açısı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasında etkili olmuştur.
- Nümerik simülasyonla elde edilen çizgisel yüzey pürüzlüğü ve kesme yüzeyi, çeşitli parametreler için deneysel sonuçlarla

karşılaştırılmış ve simülasyon sonuçlarının çoğunun deneysel sonuçlarla büyük bir uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir.



Şekil 5. İşlenmiş yüzeylerin mikro fotoğrafları (21)

Fukunishi, Kobayashi ve Uchida (41), AWJ



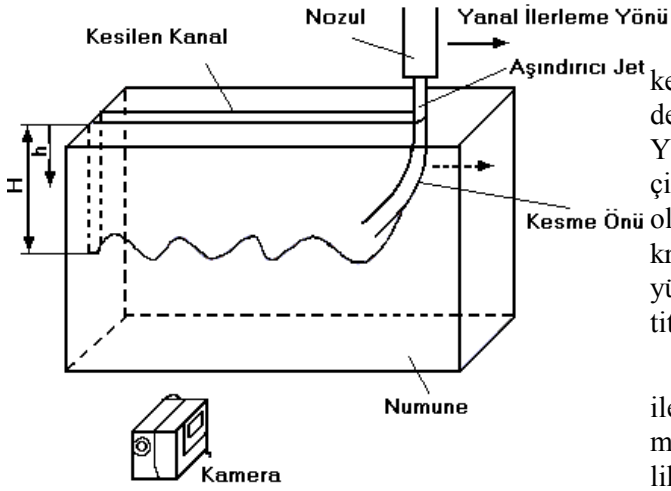
Şekil 6. Farklı yanıl hızlar için kesme yüzeyinin simüle edilmiş modelleri [21]

ile kesilen yüzeylerde oluşan izlerin mekanizmasını araştırmak için, bu mekanizmanın nümerik simülasyonu üzerine çalışmışlardır. İki boyutlu bilgisayar destekli modellerde, sürekli olmayan kesme önündeki hareket hakkında elde edilen bilgiler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. İki boyutlu maddelerden elde edilen sonuçlardan üç boyutlu kesik yüzeylerinin özellikleri simüle edilmiştir. Bilgisayar ortamında modellenen kesik yüzeylerin istatistiksel karakteristiklerinin gerçek işleme yüzeyleriyle büyük bir uyum sergilediği araştırmada çizgisel izlerin oluşumunda aşındırıcı jet akımı içerisindeki aşındırıcı taneciklerin rasgele dağılımının etkili olduğunu ortaya koymuşlardır. Sunulan nümerik simülasyonun, çizgisel izlerin

yorumu ve kontrolü için yapılacak araştırmalarda kullanılabileceği görülmektedir.

Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 7'de, deneysel olarak elde edilmiş yüzey modeli Şekil 8'de ve nümerik simülasyonla elde edilen yüzey modeli ise Şekil 9'da gösterilmiştir.

Chao ve Geskin (40), AWJ ile kesme sırasındaki yüzey topoğrafyasının oluşumunu araştırdıkları çalışmalarında; kesme yönünün, çizgisel yüzey pürüzlük desenini dramatik bir şekilde değiştirdiğini gözlemişlerdir. Aynı araştırmada yüzey topoğrafyasının güç spektrali Y yönünde daha yüksek bir frekans sergilerken, X yönünde çok sayıda pik (tepe) noktası sergilemekte olup genliğinde de oldukça farklı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10).

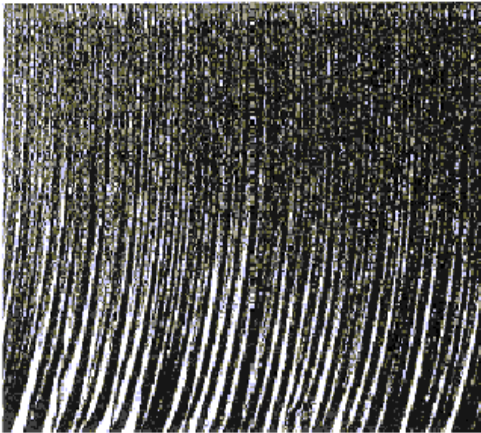


Şekil 7. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (41)

Hâkim tepe noktalarının genliği, farklı kesme hızlarında, üst yüzeyden mesafenin ikinci dereceden bir polinomu olarak oluşmuştur. Yapılan bir dizi deney sonunda, AWJ sistemlerde çizgisel oluşumun sebebinin tezgâh titreşimi olduğu tespit edilmiştir. Motor tahrik sistemi ve kramayer/ pinyon transmisyonu, kesilen yüzeylerde çeşitli çizgisel izlere sebep olan titreşimin kaynakları olarak yorumlanmıştır.

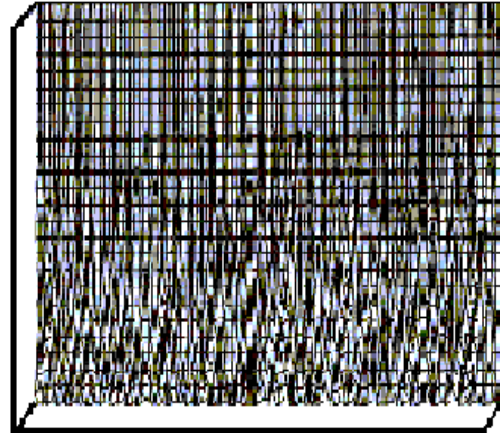
Ohlsson, Powell ve Magnusson (42), AWJ ile kesmede çizgisel yüzey oluşumunun mekanizmalarını araştırdıkları çalışmalarında, yumuşak çelik ve alüminyum numuneler üzerinde belli bir aralıktaki işleme parametreleri ile yaptıkları kesme işlemlerinde, kesilen yüzeydeki çizgisel oluşumları analiz etmişlerdir. Bu analizler, kesme önü geometrisindeki değişimler esasına bağlı çizgisel yüzey özelliklerinin oluşum modellerinin gelişimini açıklamada rehberlik etmiştir. Kesme

Yanal İlerleme Yönü

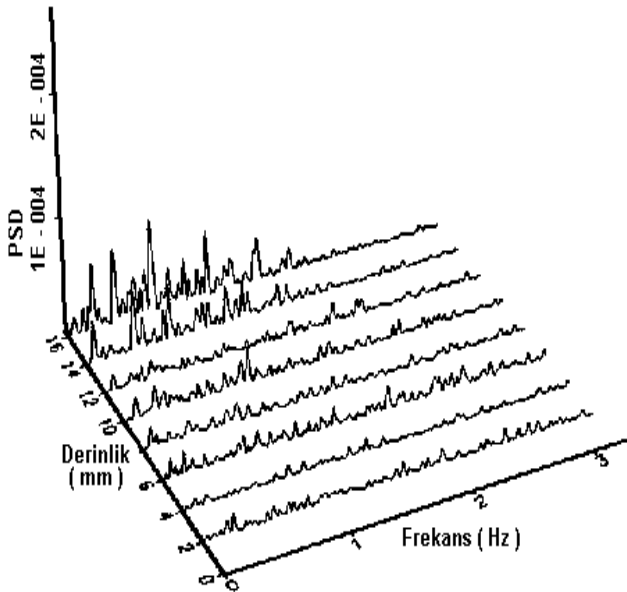


Şekil 8. Deneyel olarak elde edilen çizgisel oluşum

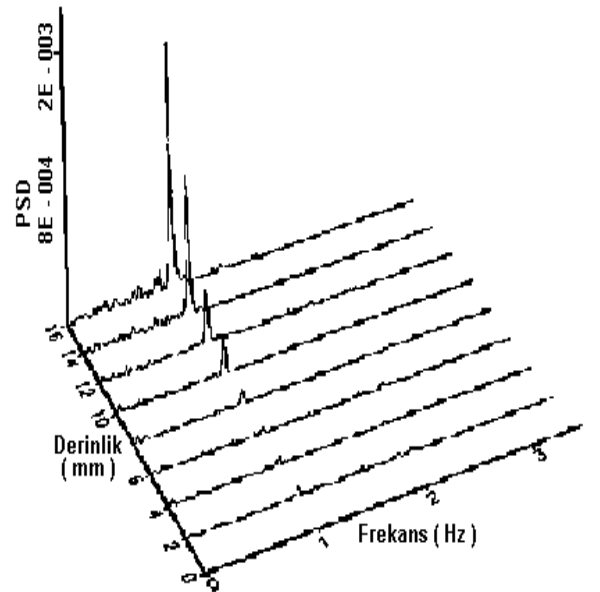
Yanal ilerleme yönü



Şekil 9. Çizgisel oluşumun 3D görünümü



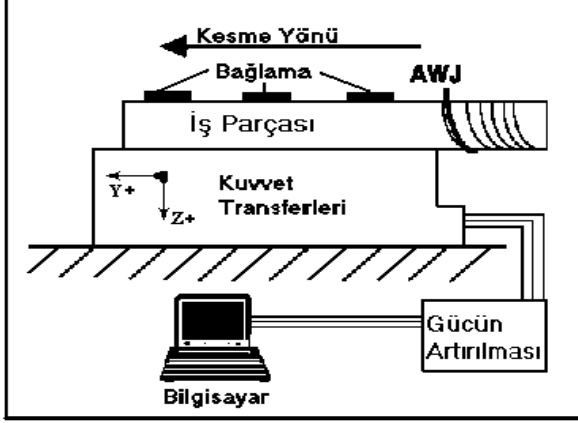
a) X Yönünde kesme sırasında



b) Y Yönünde kesme sırasında

Şekil 10. Farklı derinliklerde ölçülen güç spektral yoğunlukları [40]

önündeki bir dizi hareketli (değişken) kademelerin mevcudiyeti, saydam (transparan) malzemeler işlenirken, yüksek hızlı kamerayla kayıt yapmak suretiyle doğrulanmıştır. Araştırmadaki deneysel çalışmalar;

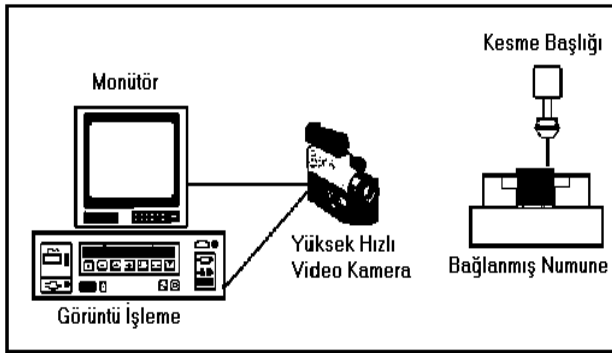


Şekil 11. Aşındırıcı (erozyon) kuvvet ölçümü için deney düzeneği (42)

- Metallerin işlenmesi sırasında iş parçasında oluşan kuvvetlerin ölçümü ve üretilen kesilmiş kenarların analizi (Şekil 11).
- Saydam malzemeler kesilirken kesme önündeki davranışın yüksek hızlı video kaydıyla değerlendirilmesi (Şekil 12).

şeklinde iki bölüm hâlinde sunulmuştur.

İşleme sırasında iş parçaları üzerinde etkili olan kuvvetlerin ortalama değerleri Çizelge 2’de gösterilmiştir:

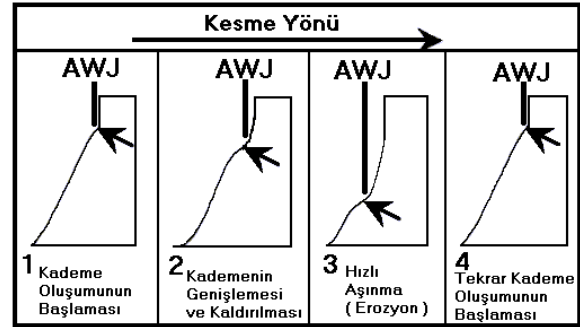


Şekil 12. Yüksek hızda video kaydı için deney düzeneği (42)

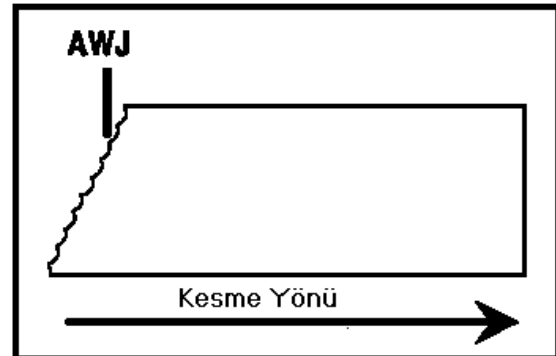
Çizelge 2- İşleme sırasında parça üzerinde etkili olan kuvvetlerin ortalama değerleri (42)

Malzeme	Kalınlık (mm)	Kesme Hızı (mm/s)	Ortalama Kuvvet (N)	
			F _y	F _z
Yumuşak Çelik	10	1.67	8.94	7.26
	10	3.33	15.34	14.62
Alüminyum	10	5.58	9.92	6.84
	10	11.17	15.80	17.15

Araştırmacılar deneylere bağlı olarak kesme verimliliği ve yüzey özellikleri hakkındaki değerlendirmelerini, kesme önünde oluşan geometriye, özellikle belli bir eğimi olan bu geometri üzerindeki dinamik bir yapıya sahip kademe oluşumlarına ve kademelerin aşınması esasına göre yapmışlardır. Kesme önünde oluşan kademelerdeki aşınma (erozyon) Şekil 13’te kesme yönüne bağlı kademelerin genel durumu ise Şekil 14’te gösterilmiştir.



Şekil 13. Kesme önündeki geometride kademe oluşumu ve aşınması (42)



Şekil 14. Çok sayıda kademe oluşumuyla gelişen kesme önü geometrisi (42)

Bu araştırmada elde edilen sonuçlar, aşağıda özetlenmiştir:

- AWJ ile kesme sırasında malzemeye etki eden kuvvet, kesme yönünde olduğu kadar, düşey yönde de etki eder.
- Her iki yönde etki eden kuvvetin büyüklüğü, işparçasının malzeme özellikleri tarafından değil, asıl kesme önündeki geometri tarafından belirlenir.
- Kesme önündeki geometri;
 - a) AWJ' ye göre küçük açıyla eğik olan genel bir eğim,
 - b) Bu eğim üzerinde yüksek düzeyde aşınma (erozyon) alanları olarak etki eden küçük ölçekli bir dizi kademe

olmak üzere iki bileşene sahiptir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Aşındırıcı su jeti (AWJ) ile kesilen yüzeyde paralel hatlar şeklinde meydana gelen yüzey pürüzlüğü, yöntemdeki yüksek jet hızı ve karmaşık türbülanslı akış sebebiyle tam olarak izah edilememektedir. Elde edilen yüzey topografisi, su jetine katılan aşındırıcı taneciklerin oluşturduğu iki aşamalı mekanizmaya bağlı olarak;

- Kesme-aşınma mekanizmasının etkili olduğu üst tarafta daha düzgün
- Deformasyon-aşınma mekanizmasının etkili olduğu alt tarafta ise birbirine paralel çizgiler şeklinde daha pürüzlü bir yapı sergilemektedir.

Jet hüzmesinin ihtiva ettiği enerjinin büyük bir bölümünün kaybedildiği üst bölgede daha düzgün yüzey özellikleri elde edilirken, daha sonra hüzmenin sapması ve malzemeye çarpma açısının büyümesiyle kesme mekanizması, deformasyon mekanizmasına dönüşmekte ve yüzey özellikleri de bozulmaktadır.

Bu temel bilgiler ışığında, AWJ ile işlemede elde edilen yüzey kalitesi üzerine yapılan çalışmalarda elde edilen genel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- AWJ ile işlenen bir yüzeyin kalitesini, alt kısımda paralel çizgiler hâlinde oluşan dalgalı yüzey belirler.

- Denenen farklı özelliklere sahip malzemelerin hepsinde aynı yüzey özellikleri elde edilmiştir.
- Malzeme kalınlığı arttıkça, yüzeydeki dalgalanmaların derinliği ve buna bağlı olarak da yüzey pürüzlüğü artmaktadır.
- Jet hüzmesindeki sapmalara bağlı olarak oluşan yüzeydeki bu dalgalanmalar, sünek veya gevrek tüm malzemelerde görülmekte ve malzeme kalınlığına bağlı olarak da artmaktadır.
- Kesme performansının iyileştirilmesini sağlayan kesme parametreleriyle (optimum parametreler) ile yüzey kalitesinde de iyileşme sağlanmaktadır.
- Farklı aşınma mekanizmalarının etkili olduğu her iki bölgede de daha düşük kesme hızları, daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesini sağlamaktadır.
- Daha düşük boşaltım basınçları, kesme hassasiyetini artırırken çizgisel pürüzlüğü azaltmaktadır.
- Nozul yanal hızının, yüzey kalitesi üzerindeki etkisi oldukça düşüktür.
- Nozul açısının büyütülmesi yüzey kalitesi üzerinde olumlu etkilere sahiptir.
- AWJ sistemlerde tezgâh titreşimlerinin de çizgisel pürüzlük üzerinde önemli etkisi olup bu titreşimlerin ana kaynağının motor tahrik sistemleri ile kramayer / pinyon transmisyonu olduğu gözlenmiştir.
- Kesme verimliliği ve yüzey özellikleri; kesme önünde oluşan geometriye ve bu geometri üzerinde dinamik bir yapıya sahip kademe oluşumlarına bağlı olarak değerlendirilebilir.
- AWJ ile işlemede, her iki yönde etkili olan kuvvetler de malzeme özelliklerinden çok, kesme önündeki geometriye bağlı olarak değişmektedir.
- Kesme önü hareketi ile çizgisel yüzey oluşumu arasındaki ilişkiler iki veya üç boyutlu nümerik simülasyonlarla incelenmiş ve simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında oldukça yüksek bir uyum gözlenmiştir. Bu sebeple, elde

edilen simülasyon modelleri, çizgisel izlerin yorumu ve kontrolü için yapılacak araştırmalarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ohlsson, L., "The Theory and Practice of Abrasive Water Jet Cutting", PhD Thesis pp. 3-35, Lulea University of Technology, Sweden, 1995.
2. Öjmertz, C., "Abrasive Waterjet Machining", MSc Thesis, pp 5-17, Chalmers University of Technology – Göteborg, Sweden, 1994.
3. Schwartz, M. M., "Water Cuts Composite Aircraft Parts", AM – American Machinist, pp. 103–105, Mc Graw-Hill, USA, March 1983.
4. Hood, M., Nordlund, R., Thimons, E., "A Study of Rock Erosion Using High-Pressure Water Jets", Int. Journal of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., Vol. 27 No:2, pp. 77-86 USA, 1990
5. Geier, L. E., Hood, M., "The Effect on Cutting Tool Forces of Pre-Weaking a Rock Surface by Waterjet Kerfing", Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp 1-6, February 1989. USA.
6. Johnston, C. E., "Waterjet / Abrasive Waterjet Machining", Metals Handbook 9th Edition Vol. 16– Machining, pp. 520-527, ASM International Handbook ommittee, USA, 1989.
7. Matsumoto, O., Sugihara, M., Miya, K., "Under Water Cutting of Reactor Core Internals by CO Laser Using Local-Dry-Zone Creating Nozzle", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 29, No:11, pp. 1074- 1079, November, 1992.
8. Harada, M., and et al, "Reactor Dismontling by Abrasive Water Jet Cutting System" ISME International Journal, Series B, Vol. 36, No: 3, pp. 499-504, 1993.
9. Miller, D., "Abrasive Water Jets for Demilitarization of Explosive Meterials", 8th. American Water Jet Conference, pp. 445-457, USA, 1995
10. Valco, T. D., Coble, C.G., Ruff, L.H., "Water Jet Cutting of Sugarcane", ASAE (American Soc. Of Agricultural Eng.) Transaction, Vol. 32 (2), pp. 373-378, March-April, 1989.
11. Becker, R., Gray, G.M., "Evaluation of a Water Jet Cutting System for Slicing Potatoes", Journal of Food Science, Vol. 57, No:1, pp. 132-137, 1992.
12. Merle, C., and et al, "Performances of HP Fluid Jet to Cut Food Products", 7th American Water Jet Conference, pp. 103-117, USA, 1993.
13. "Waterjet Cutting for Frozen Food Products", FLOW FACTS – Flow International Corporation, Fic-091, USA, July 1991.
14. "Ultrahigh-Pressure Waterjets- The Cutting Edge for The Food Industry", FLOW FACTS– Flow International Corporation, Fic-139, USA, May 1990.
15. Hunziker, U. W., "Water Cuts Sharply", Swiss Quality Production – EDE, pp. 44-52 Honser Publishers, München, 1992.
16. Cristian, M. O., Todd, R.H., "Designing and Building a Water Jet Cutting Machine" Mechanical Engineering, pp. 68-72, July 1992.
17. Momber, A.W., Kovacevic, R., "Principles of AWJ Machining", Springer-Verlag London Limited, UK, 1988.
18. Mc Geough, I.A., "Advanced Method of Machining", Chapman and Hall Ltd., USA, 1988.
19. Kobayashi, R., "Critical Reviev of Basic Research in Jet Cutting Technology " The 3rd Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, pp. 1-34 Tainan, Taiwan, 30 November – 2 December, 1992.
20. Geraghty, M., "Studies or Surveys Done On The Use and Performance of The Waterjet in The Construction Industry", PhD Thesis, New York University, 1997.
21. Niu, M., Fukunishi, Y., Sawamura T., "Control of Striated Roughness On The Surface Cut by Abrasive Water Jet", BHR Group Jetting Technology, pp. 769-777 Ishinomaki Senshu University, Japan, 1996.
22. Singh, P. L., Chen, W.L., Munoz, I., "Comprehensive Evaluation of Abrasive Waterjet Cut Surface Quality", 6th

- American Water Jet Conference, pp. 139-161, Houston, USA, 1991
23. Hashish, M., "Prediction Models for AWJ Machining Operations", 7th American Water Jet Conference, pp. 205-216, Seattle, USA, 1993.
 24. Tan, D. K. M. "A Model for The Surface Finish in Abrasive Waterjet Cutting", Proceedings of 8th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp. 31-38, England, 1986.
 25. Hashish, M., "Steel Cutting With Abrasive Water Jets", Proceedings of 6th International Symposium on Jet Cutting Technology, Paper K3, University of Surrey, UK, 1982.
 26. Blickwedel, H., Guo, N. S., Haferkamp, H., Louis, H., "Prediction of Abrasive Jet Cutting Performance and Quality", Proceedings of 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, pp.163-179, BHRA, Fluid Engineering Centre, Cranfield, UK, 1990.
 27. Blickwedel, H., "Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen", Dissertation, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2; Fertigungstechnik, Nr. 206, VDI Universitat Hannover, Verlag, 1990.
 28. Hashish, M., "Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjets Machining Characteristics of Advanced Materials", Winter Annual Meeting of ASME, pp. 23-32 San Francisco, USA, 1989.
 29. Guo, N. S., Louis H., "Surface Structure and Kerf Geometry in Abrasive Water Jet Cutting Formation and Optimization", 7th American Water Jet Conference, pp.1-25 Seattle, USA, 1993.
 30. Kovacevic, R., "Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting", Journal of Manufacturing Systems, Vol. 10, No:1, pp. 32-40, 1991.
 31. Singh, P. J., Chen, W. L., and Munoz, J., "Comprehensive Evaluation of Abrasive Waterjet Cut Surface Quality" Proceedings of The 6th American Water Jet Conference, pp. 139-161, Qater Jet Technology Association, USA, 1991.
 32. Chao, J., Geskin, E., "Experimental Study of The Striation Formation and Spectral Analysis of The Abrasive Waterjet Generated Surfaces", 7th American Water Jet Conference, pp.27-41, Seattle, USA, 1993.
 33. Hashish, M., "Visualization of The Abrasive Waterjet Cutting Process", Experimental Mechanics, pp. 159-169, 1988.
 34. Finnie, I., "The Mechanism of Erosion of Ductile Metals", Proc. Of 3rd US Nat. Cong on App. Mech, ASME, pp.527-532, New York, USA, 1958.
 35. Bitter, J. G. A., "A Study of Erosion Phenomena", Part I - II, Wear, Vol. 6, pp. 5-21/ pp. 169-190, 1963.
 36. Hashish, M., "Characteristics of Surfaces Machined With Abrasive Waterjet", J.of Eng. Mat. And Tech., Vol. 113, pp.354-362,1991.
 37. Zeng, J., Kim, T. J., "Development of an Abrasive Waterjet Kerf Cutting Model Brittle Materials" Proc. of 11th Int. Conf. On Jet Cutting Technology, pp.485-501, Scotland, 1992
 38. Hashish, M., "The Effect of Beam Angle in Abrasive Waterjet Machining", Journal of Engineering for Industry, Vol. 115, pp. 51-56, February, 1993.
 39. Kovacevic, R., Mohan, DI, Zhang, Y.M., "Cutting Force Dynamics as a Tool for Surface Profile Monitoring in AWJ", Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, pp. 340-350, August, 1995.
 40. Chao, J., Geskin, E., Chung, Y., "Investigations of The Dynamics of The Surface Topography Formation During Abrasive Waterjet Machining", Proc. of 11th Int. Conf. On Jet Cutting Technology, Scotland, 1992.
 41. Fukunishi, Y., Kobayashi, R., Uchida, K., "Numerical Simulation of Striation on Water Jet Cutting Surface", Proc. of 8th American Water Jet Conference, pp. 157-169, Houston, USA, 1995.
 42. Ohlsson, L., Powell, J., Magnusson, C., "Mechanisms of Striation Formation in Abrasive Waterjet Cutting", Proceedings of

the 12th. Int. Conf. Or Jet Cutting Technology,
pp. 151-164, France, 1994.

