



## Aşındırıcılı su jeti ile kesmede kesme parametrelerinin granit yüzey pürüzlülüğüne etkisi

### *Effect of cutting parameters on the surface roughness of granite in abrasive waterjet cutting*

İzzet KARAKURT, Gökhan AYDIN, Kerim AYDINER

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü, TRABZON

Geliş (received) : 10 Şubat (February) 2010

Kabul (accepted) : 19 Nisan (April) 2010

#### ÖZ

Endüstrideki kullanımı her geçen gün giderek artan aşındırıcılı su jeti, geleneksel kesme ve işleme sistemlerine alternatif bir üretim yöntemidir. Aşındırıcı su jetleri, düşük kesme kuvveti gerektirmesi, esnek ve çok yönlü kesme olanağına sahip olması gibi önemli üstünlüklere sahiptir. Ancak, kesme yüzeylerinde oluşan pürüzlülük ve dalgalanma, yöntemin kullanımını sınırlayan önemli etkenler arasındadır. Son dönemlerde yapılan çalışmaların çoğu, yüzey pürüzlülüğü üzerine yoğunlaşmış ve yüzey kalitesini arttırmaya yönelik teknik arayışları da beraberinde getirmiştir. Bu çalışmada; aşındırıcılı su jeti ile kesmede, bazı kesme parametrelerinin granitlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar, Taguchi deney tasarımı tekniğine göre yapılmış ve her bir deney sonucunda, örnek kesme yüzeylerinin ortalama pürüzlülükleri ( $P_{\alpha}$ ) ölçülmüştür. Ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri kullanılarak her çalışma parametresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek yanal ilerleme hızı ve meme-örnek mesafelerinde örnek yüzey pürüzlülüklerinin arttığı belirlenmiştir. Aşındırıcı besleme oranındaki artış yüzey pürüzlülüklerinin düşmesine neden olurken, çalışma basıncındaki artış yüzey pürüzlülüklerinin artmasına neden olmuştur. Ek olarak, ince boyutlu aşındırıcı ile daha pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşındırıcı su jeti, granit kesme, yüzey pürüzlülüğü.

#### ABSTRACT

Abrasive waterjet, whose usability in industry has been recently increased, is an alternative production method to the conventional machining and processing systems. It has important advantages such as requiring low power and presenting the possibility of flexible and multi-directional cutting abilities. However, surface roughness and waviness on cut surfaces are still among the factors limiting the applicability of the method. In recent years, most related studies have focused on surface roughness and they have brought with them new technological investigations enhancing surface quality. In this study, the effect of some cutting parameters on surface roughness of granites in abrasive water jet usage is investigated. Experimental studies were conducted through the Taguchi experimental design and at the end of each experiment the average roughnesses ( $R_{\alpha}$ ) of cut surfaces of the specimens were measured. The effects of each cutting parameter on the surface roughness are analyzed in detail, using the average roughness. As a result of the study, it is determined that the surface roughnesses of the specimens were increased at higher traverse speeds and standoff distances. An increase in abrasive flow rate resulted in decreases in the surface roughnesses of the specimens, whereas an increase in the water pressure resulted in increases in the surface roughness of the specimens. Additionally, higher surface roughnesses were obtained by finer abrasive sizes.

**Key words:** Abrasive waterjet, granite cutting, surface roughness.

## GİRİŞ

Su jeti kesme teknolojisi, hemen her türlü mühendislik malzemesinin kesilmesi ve işlenmesinde kullanılabilen bir teknolojidir (Chen ve Siores, 2003). Son yıllarda, suyun kesme gücünün artırılması amacıyla sisteme eklenen aşındırıcı parçacıkları ile kaya, çelik ya da beton gibi sert malzemelerin kesilmesi ve işlenmesi daha kolay yapılabilmektedir (Külekçi, 2002; Karakurt vd., 2010).

Su jeti ile kesme işleminde, basınç yükselticiden çıkan su dar bir boru içerisinden geçerek meme içerisinde yüksek basınçta ilerler ve meme ağzına yaklaştıkça daralan kısımlarda hızını daha da arttırarak malzeme yüzeyine püskürtülür. İşlem sırasında yüzeye çarpan su jeti hüzmeleri ile oluşturulan kesme kuvveti, malzeme yüzeyinden parçacık kopararak kesme işlemini gerçekleştirir. Yüzeyden aşındırma ile uzaklaştırılan parçacık oranı; jet basıncına, yanal ilerleme hızına, kesilen malzemenin özelliğine, su jeti içerisindeki katkı maddesi (aşındırıcı malzeme) ve oranına bağlı olarak değişir (Wakuda vd., 2003; Karakurt, 2007; Hasçalık vd., 2007).

Klasik bir su jeti kesme sisteminde yüksek basınç ve jet hızı belirli sistem elemanları tarafından sağlanır (Yazıcıoğlu vd., 1993). Bu sistem elemanları başlıca; basınç ünitesi, aşındırıcı karışım ünitesi, kesme kafası ve bilgisayar kontrol ünitesi olarak dört ana bileşenden oluşmakta olup sistemin şematik görünümü Şekil 1’de verilmiştir.

Su jeti ile kesilen malzemenin yüzeyine bakıldığında, düzgün olan üst kısım ve onu takip eden çizgili, dalgalı bir bölge görülür. Düzgün görülen üst kısım kesme aşınma bölgesi olarak adlandırılırken daha çok çizgili ya da dalgalı görünen alt kısım deformasyon aşınma bölgesi olarak adlandırılır. Birinci bölge daha düzgün bir yüzey olup, malzeme pürüzlülük kalitesinin belirlendiği bölgedir. Bu bölgenin yüzey kalitesi, başlıca aşındırıcı tanelerin malzeme yüzeyine dik açılarla çarpmasının bir sonucudur. İkinci bölge ise, aşındırıcı parçacıklarının malzeme yüzeyine geniş açılarda çarpmasıyla oluştuğu bölgedir. Şekil 2’de aşındırıcı su jeti ile kesik yüzey oluşumuna ait görünüm sunulmuştur (Liu ve Chen, 2004; Akkurt, 2009).

Su jeti ile kesilen malzemelerde elde edilen yüzey karakteristikleri; çalışma basıncı, kullanılan aşındırıcı tipi, memenin örneğe olan mesafesi, aşındırıcı

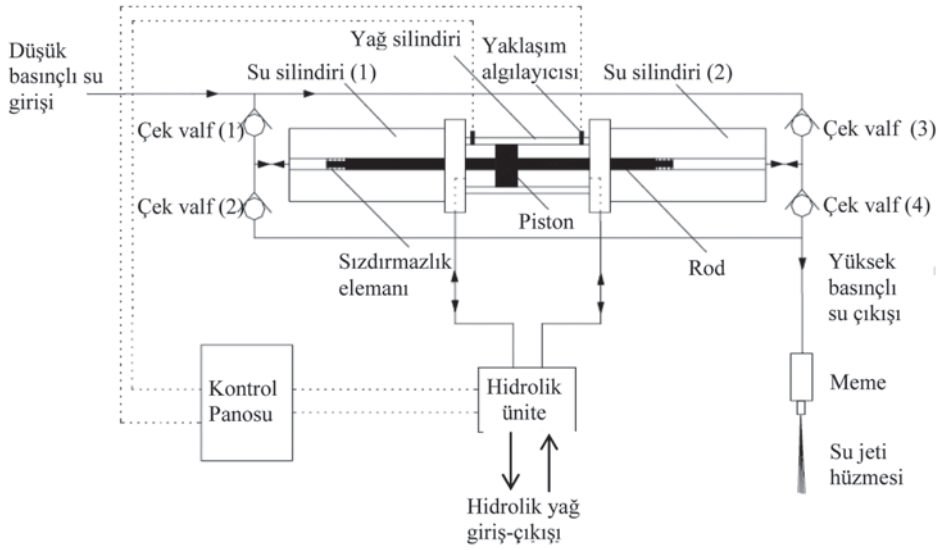
besleme miktarı, kesilen malzeme ve su jeti makinasına ait özellikler gibi birçok faktörün denetimi altındadır. Literatürde su jeti kesme yöntemi konusunda gerek çalışma parametrelerinin, gerekse makine ve malzeme özelliklerinin araştırıldığı çok sayıda çalışma mevcuttur. Su jeti kesme yönteminin kayaların kesiminde kullanılabilirliğini araştıran az sayıda araştırmacı, başlıca kesme mekanizmasının açıklanması ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi üzerinde durmuşlardır (Vijay, 1995; Liu ve Chen, 2004, Miranda ve Quintino, 2005; Huang vd., 2006). Ojmertz (1993), düşük yanal ilerleme hızlarının düzensiz bir yüzey morfolojisine neden olmasına rağmen daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilebileceğini belirtmiştir. Böyle bir durumun ancak düşük yanal hız, yüksek aşındırıcı besleme oranı ve küçük delik çapları (su çıkışının gerçekleştiği açıklık) ile mümkün olabileceğini ifade etmiştir. Bir başka çalışmada, Chen ve Siores (2003), aşındırıcı su jeti ile kesmenin malzeme yüzeyinde çizikli bir yapı oluşturacağını ve bunun da kesme sisteminin kullanımını sınırlayan bir durum olduğunu belirtmişlerdir. Son dönem çalışmalarından birinde Akkurt vd. (2004), örnek kalınlığına yakın kesme derinliklerinde yüzey pürüzlülüğünün giderek en yüksek değere ulaştığını belirlemişlerdir. Yapılan bu çalışmalara rağmen, kesme sonrası malzeme yüzeyinde oluşan yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığın giderilmesi yönündeki teknik arayışlar özel bir çaba alanı olmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, aşındırıcı su jeti ile kesmede bazı kesme parametrelerinin malzeme yüzey kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Benzer tane boyutu aralıklarına sahip, Aksaray Yaylak, Giresun Vizon ve Azul Platino olmak üzere üç farklı granit örneğinin kullanıldığı çalışmada, kesme parametreleri ile kesme aşınma bölgesi pürüzlülük değerlerinin değişimi incelenmiştir.

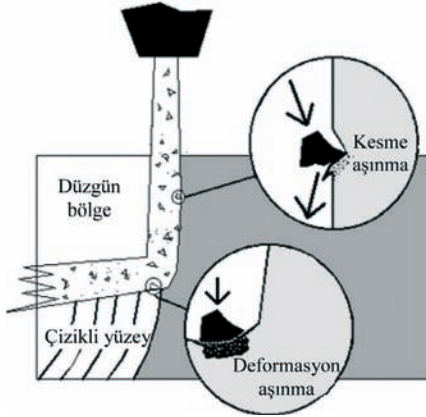
## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### Malzeme ve Yöntem

Deney çalışmalarında üretici firmalardan temin edilmiş ve 3x10x20 cm boyutundaki granit örnekleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan aşındırıcı malzemenin sertliği 7.5–8 Mohs arasında olan garnet/granat’tır. Kullanılan garnetin kimyasal bileşimi, % 36 FeO, % 33 SiO<sub>2</sub>, % 20 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, % 4 MgO, % 3 TiO<sub>2</sub>, % 2 CaO ve % 2 MnO<sub>2</sub>’dir.



Şekil 1. Su jeti kesme sisteminin çalışma ilkesi ve temel elemanları (Geren ve Tunç, 2008).  
Figure 1. Basic components and working principal of the waterjet systems (Geren and Tunç, 2008).



Şekil 2. Aşındırıcılı su jeti ile kesik yüzey oluşumu (Akkurt, 2009).  
Figure 2. Generation of the cut surface by abrasive waterjet (Akkurt, 2009).

Deneylerde kullanılan örneklerin mineralojik bileşimleri, ince kesitler üzerinden belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1’de sunulmuştur. Ayrıca gerek ince kesit analizleri, gerekse görüntü analizi yazılımı (De-Winter Material Plus 4.1) kullanılarak yapılan tane boyu dağılımı ve faz analizleri ile örneklerin tane boyu dağılımlarının genellikle 0.5–6.5 mm aralığında değiştiği belirlenmiştir. Mineralojik analize ek olarak görüntü analiz yazılımı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mineralojik analizle uyumlu olduğu görülmüştür.

3 cm kalınlık, 10 cm genişlik ve 20 cm uzunluğundaki granit örnekler, uzunlukları boyunca Çizelge 2’deki her bir deney koşulunda, dört eşit şekilde aşındırıcılı su jeti ile kesilmiştir (Şekil 3). Bu şekilde elde edilen örnek kesim yüzeylerindeki pürüzlülük ölçümleri, daha düğüün olan kesme aşınma bölgesinden (Şekil 2), Mitutoyo SJ-301 Surf test pürüzlülük ölçer cihazı (Şekil 4) kullanılarak ölçülmüştür.

Su jeti hüzmesinin örneğe girdiği noktadan itibaren derinliği arttıkça, jetteki sapma miktarı ve yüzeydeki pürüzlülük değeri de artmaktadır. Örnek kesme derinliğinin artmasıyla yüzeyde oluşan pürüzlülük çizikliğe/dalgalılığa dönüşmektedir (bkz. Şekil 2). Bu nedenle, yüzeye temas ilkesine göre çalışan SJ-301 Surf test iğne tipli pürüzlülük ölçer ile örnek kesim yüzeyleri boyunca ölçüm alınamamaktadır. Tüm örneklerde belirli bir hat belirlenerek (kesme aşınma bölgesi) yüzey pürüzlülük değeri bu hat üzerinde alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değeri olarak, orta hat-tan profile olan uzaklık değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade eden ortalama yüzey pürüzlülüğü ( $P_a$ ,  $\mu\text{m}$ ) esas alınmıştır. Her bir deney koşulu için kesilen örneklerden toplam sekiz yüzey pürüzlülüğü değeri ölçülmüş ve sonuç  $P_a$  değeri, bu sekiz değer aritmetik ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Böylelikle deneysel hata yapılmasının önüne geçilerek güvenilirliğin artması sağlanmıştır.

Çizelge 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan örneklere ait özellikler.

Table 1. Main properties of the specimens used in the experimental studies.

	Özellik	Aksaray Yaylak	Giresun Vizon	Azul Platino
Fiziksel ve mekanik	Tane boyu aralığı (mm)	0.4- 6.4	0.5-7	0.4-7.4
	Su emme oranı (%)	0.28	0.20	0.19
	Birim hacim ağırlık (KN/m <sup>3</sup> )	26.2	26.7	25.9
	Tek eksenli sıkışma dayanımı (MPa)	112.5	135	138.5
	Eğilme dayanımı (MPa)	7.6	18.5	14.5
	Alkali feldispat (Mikroklin, Ortoklaz)	26	52	57
Mineralojik bileşim (%)	Kuvars	22	14	25
	Plajiyoklaz	40	24	10
	Biyotit	7	4	6
	Diğer (amfibol)	5	3	2

Çizelge 2. L16[44\*21] ortogonal dizinine göre tasarımlanmış deneyin faktör ve seviyeleri.

Table 2. Factors and levels of the experiment with respect to the orthogonal array of L16[44\*21].

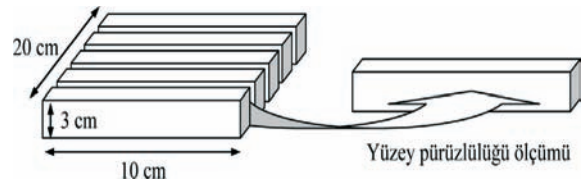
Deney No.	Faktör sayısı				
	Yanal ilerleme hızı (mm/dk)	Aşındırıcı besleme oranı (g/dk)	Meme-örnek mesafesi (mm)	Çalışma basıncı (MPa)	Aşındırıcı boyutu (Mesh)
1	100	150	2	200	80
2	100	200	4	250	80
3	100	250	6	300	120
4	100	300	8	350	120
5	150	150	4	300	120
6	150	200	2	350	120
7	150	250	8	200	80
8	150	300	6	250	80
9	200	150	6	350	80
10	200	200	8	300	80
11	200	250	2	250	120
12	200	300	4	200	120
13	250	150	8	250	120
14	250	200	6	200	120
15	250	250	4	350	80
16	250	300	2	300	80

## Deney Düzenegi

Çalışmalarda üç eksende hareket yeteneğine sahip ve bilgisayar kontrollü bir su jeti makinesi kullanılmıştır. Kesme deneyleri özel bir firmada gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneginin şematik görünümü Şekil 5'de, ayrıca su jeti makinesine ait özellikler de Çizelge 3'de verilmiştir.

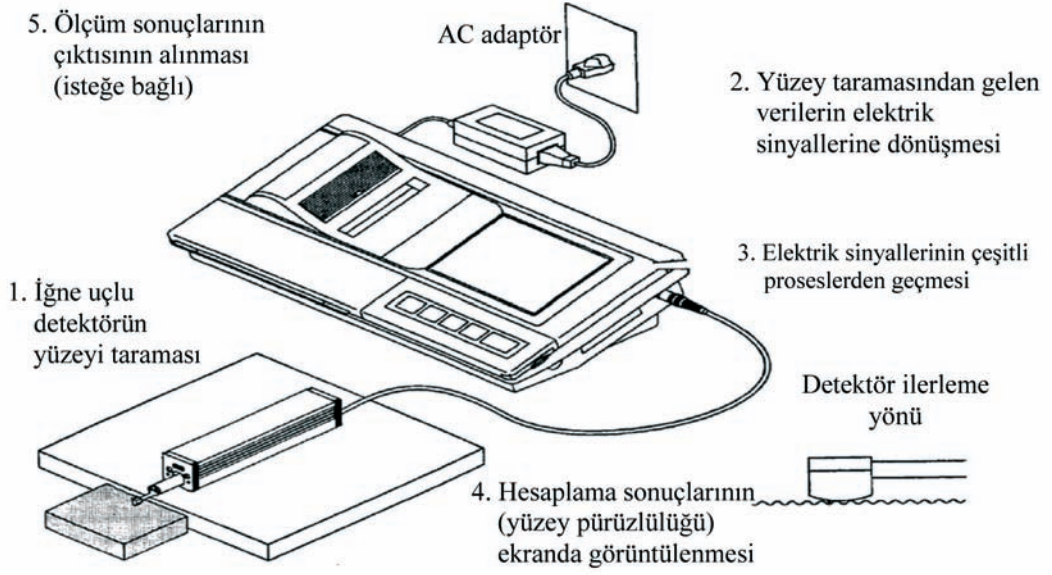
## Deney Tasarımı

Klasik deney tasarım yöntemleri, faktörler arasındaki etkileşimin göz ardı edilmesine ve deney sonuçlarının yorumlanmasında yanıltıcı bilgilerin

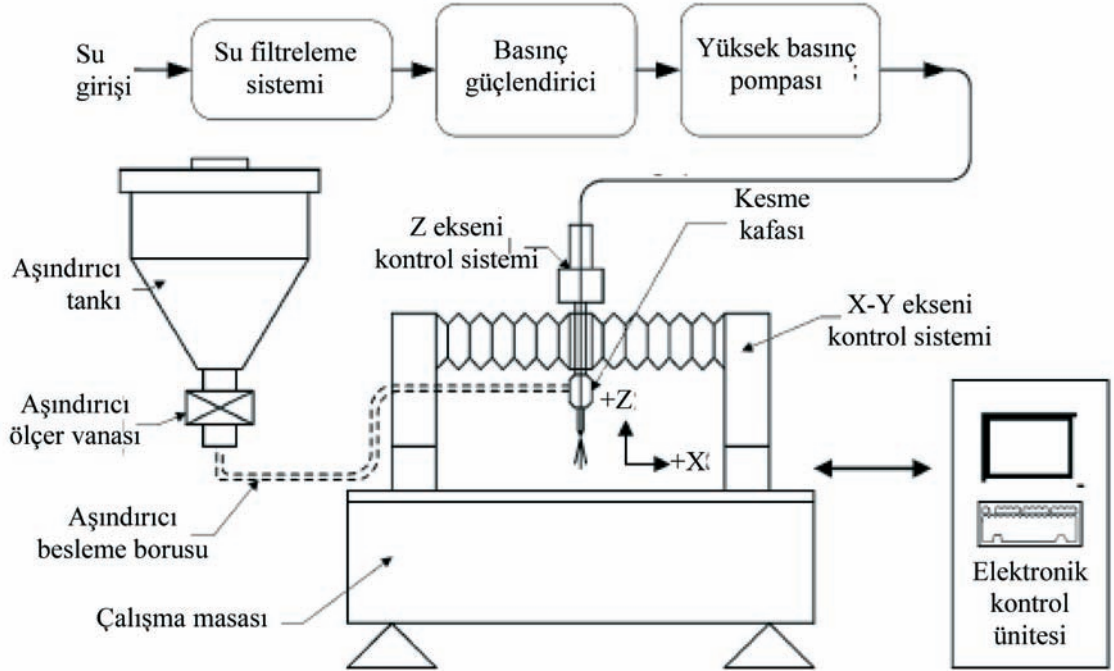


Şekil 3. Kesme işlemi sonrası granit örnekler ve örnek yüzey pürüzlülük ölçümleri.

Figure 3. Granite specimens after cutting and measurement of the surface roughness.



Şekil 4. SJ-301 Surf test iğne uçlu pürüzlülük ölçerin şematik görünümü ve çalışma ilkesi.  
Figure 4. A schematic illustration and working principal of the SJ-301 Surf test.



Şekil 5. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneğinin şematik görünümü (Duflou vd., 2001'den değiştirilerek).  
Figure 5. A schematic view of the experimental set-up (modified from Duflou et al., 2001).



Çizelge 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan su jeti makinasına ait özellikler.

Table 3. Properties of the waterjet machine used in the experimental studies.

Makina tipi	SL-V 50 HP (KMT)
Enerji tüketimi (kwh)	40
Aşındırıcı tüketimi (g/dk)	100-400
Meme çapı (mm)	1,1
Meme Uzunluğu (mm)	75
Su tüketimi (lt/dk)	3,8

ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Diğer taraftan, tüm kombinasyonların denenmesi yüksek maliyet ve zaman kaybına yol açacak, hatta çoğu kez uygulanması mümkün olmayan deney tasarımları ortaya çıkacaktır (Savaşkan vd., 2004; Kasman, 2009; Canıyılmaz ve Kutay, 2003). Bu nedenle, çalışma kapsamında klasik full faktöriyel tasarımlarda yapılan parametrenin eğilimini belirleme yaklaşımı yerine, değişkenlerin ilişkisinin de araştırıldığı Taguchi ortogonal dizin yaklaşımı kullanılmıştır. Taguchi deney tasarımı, faktör ve seviye sayısına göre standart ortogonal dizinlerden oluşan bir istatistiksel deney tasarım tekniğidir (Zhang vd., 2007).

Biri hariç, her biri dört seviyeli olan beş farklı çalışma parametresinin kesme yüzey pürüzlülüğüne etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, tam faktöriyel tasarıma göre çok sayıda deneyin yapılması gerekirken, Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak daha az sayıda deneyle çalışma gerçekleştirilmiştir. Böylelikle deney sayısının azalmasıyla zaman ve maliyet açısından avantaj sağlanmıştır. Deney faktörleri (kesme parametreleri) literatüre uygun olarak yanıl ilerleme hızı, aşındırıcı besleme oranı, memenin örneğe mesafesi, çalışma (pompa) basıncı ve aşındırıcı boyutu seçilmiştir. Aşındırıcı boyutu etkisi boyut teminindeki güçlükler nedeniyle iki farklı değer için araştırılmıştır. Kesme parametreleri ve seviyeleri dikkate alındığında, Taguchi deney tasarım tekniğinin öngördüğü standart ortogonal dizinlerden  $L_{16}(4^* 2^1)$  dizini deney tasarımı olarak seçilmiştir.

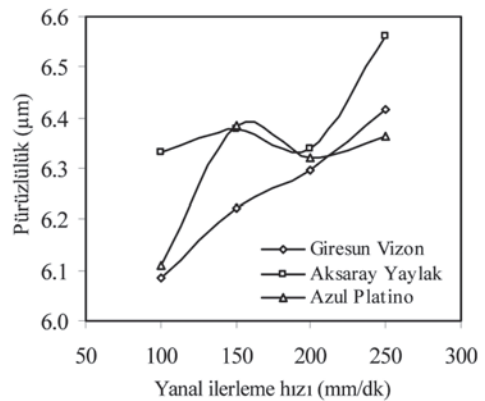
## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Yanal İlerleme Hızı Değişimi

Yanal ilerleme hızındaki değişimin çalışılan örneklerin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Yanal hızdaki artış, örnek yüzey

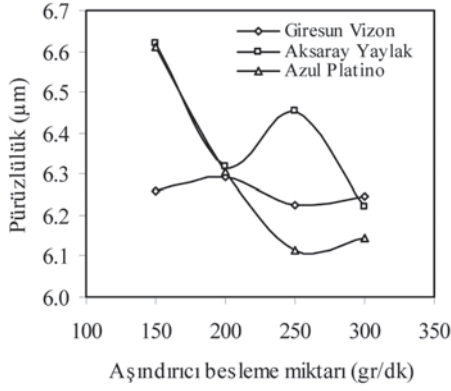
pürüzlülüklerini arttırma yönünde etki etmiştir. Bu artış; Giresun Vizon'da genel olarak düzgü bir artış şeklinde gerçekleşirken, Aksaray Yaylak ve Azul Platino'da genel eğilimden sapmaların meydana geldiği aralıklar şeklinde olmuştur. Her iki örneğin pürüzlülükleri 100-150 mm/dk aralığında artış, 150 ile 200 mm/dk aralığında ise düşüş göstermiştir. 200 mm/dk sonrasında ise, her iki örneğin de pürüzlülükleri artmıştır.

Yanal ilerleme hızı, basitçe, malzemenin su jetinin aşındırma/kesme etkisine maruz kaldığı süre olarak ifade edilebilir. Yanal hızının azalması malzeme üzerindeki bir noktanın daha uzun süre su jeti etkisinde kalması anlamına gelir. Böylelikle kesilen yüzeyde birim alana düşen partikül sayısı artmakta, buna paralel olarak kesme aşınma bölgesi genişlemekte ve geriden gelen partiküller daha önceki aşamalarda kabaca kesilen kısımları düzelterek yüzey pürüzlülük kalitesini arttırmaktadır (Chen vd., 1997; Külekçi ve Akkurt, 2001). Aksi durumda su jeti hızının artması, malzeme yüzeyinde oluşacak aşındırma etkisinin azalması anlamına gelecek ve yüzey kalitesine kötüleşmeye neden olacaktır.



Şekil 6. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin yanıl ilerleme hızına bağlı değişimi.

Figure 6. Variation of surface roughnesses with traverse speed.



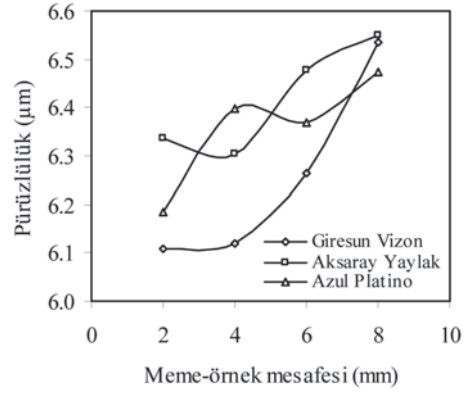
Şekil 7. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi.

Figure 7. Variation of surface roughnesses with abrasive flow rate.

Bazı örneklerde genel değişim eğilimini bozar durumda anlık ya da kısa aralıklar içinde meydana gelen değişimler veya dalgalanmalar söz konusudur. Örnek bir durum, Azul Platino'da 150 mm/dk değerinde gözlenen piktir. Bu türden sapmaların; yerel malzeme özelliklerinde meydana gelen değişimler (kuvars tanelerinin öbekleşmesi, ya da boşluklar gibi) ve/veya su+aşındırıcı karışımının akışı rejimi ile ilgili değişmelerin sonucu olduğu düşünülmektedir. Bu tür sapmalar hariç tutulduğunda, örneklerin genel değişim eğilimi anlamlı ve uyumlu görünmektedir. Bir başka deyişle, örnek pürüzlülük değerleri artan hızla birlikte artış göstermiştir. Literatürde gerek kaya gerekse farklı malzemelerle yapılan bazı çalışmalarda da, yanal ilerleme hızı-pürüzlülük değişimi için benzer davranışlar gözlenmiştir. (Singh vd., 1991; Gudimetla vd., 2002; Ma ve Deam, 2006; Haşçalık vd., 2007; Karakurt, 2007).

### Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Aşındırıcı miktarı artışının çalışılan kayaların pürüzlülüklerinin değişimine etkisi iki farklı şekilde gerçekleşmiştir (Şekil 7). Giresun Vizon'da çok dar bir aralıkta dalgalanmaların da meydana geldiği, ancak aşındırıcı besleme miktarı artışının pürüzlülük üzerinde önemli bir değişime neden olmadığı genel bir eğilim gözlenmiştir. Aksaray Yaylak ve Azul Platino'da ise, artan aşındırıcı besleme miktarı ile pürüzlülüğün belirli bir aralıkta önemli ölçüde azaldığı ve sonrasında ise sabit kalma eğiliminde olduğu söylenebilir.

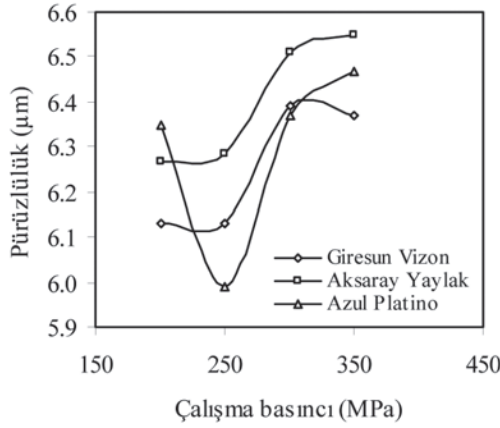


Şekil 8. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi.

Figure 8. Variation of surface roughnesses with stand-off distance.

Yaylak'ta 250 gr/dk'da gözlenen doruk değerine ise, malzeme ve/veya su+aşındırıcı karışımının akış özelliklerinden kaynaklanan bir durum olduğu düşünülmektedir. Bu dalgalanma hariç tutulduğunda, yaklaşık 250 gr/dk'dan sonra her üç kayada da pürüzlülük değerlerinin sabit kalma eğiliminde oldukları anlaşılmaktadır.

Aşındırıcı besleme miktarının malzeme yüzey kalitesine etkisi, daha çok yüzey dalgalılığı ve kesme genişliği ile ilgilidir. Chen ve Siores (2003) ve Chen vd. (2003), aşındırma ile malzemeden koparılan parçacık miktarının aşındırıcı taneciklerin kinetik enerjisi tarafından denetlendiğini belirlemişlerdir. Bu araştırmacılar ayrıca, jet içinde aşındırıcı taneciklerin dalgalı bir dağılım gösterdiğini ve bağlı olarak kesilen malzeme yüzeyinde oluşan dalgalılığa da bu dağılımın katkı yaptığını öne sürmüşlerdir. Artan aşındırıcı miktarı birim alana temas edecek aşındırıcı partiküllerinin artması anlamına geleceği için, yüzeyde oluşacak çiziklik ya da dalgalılığın da azalması beklenen bir durumdur. Öte yandan Momber vd. (2002), sert kaya ve minerallerin (granitlerde, kuvars ve feldispat) bir mikro çatlak ağının oluşumu ile deforme olduklarını belirtmiştir. Taneli yapılarda taneler arası bağ ve tane boyu dağılımı gibi özellikler başlıca aşındırıcı taneciklerin etkisi nedeniyle granit gibi kayaların davranışında genel eğilimin aksine sapmaların ortaya çıkmasına neden olarak görülebilir (bknz. Şekil 7). Tane boyu dağılımının yanı sıra, içerilen mineral türleri de bu tür etkilere katkı yapabilecek faktörlerdir.



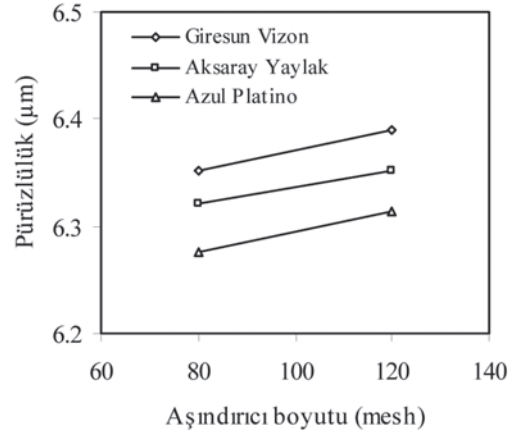
Şekil 9. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi.

Figure 9. Variation of surface roughnesses with water-jet pressure.

### Meme-Örnek Mesafesi Değişimi

Meme-örnek mesafesi artışının etkisi örnek pürüzlülüklerinin artışı yönünde olmuştur (Şekil 8). Yerel dalgalanmalar hariç tutulduğunda yaklaşık doğrusal bir artışın her üç örnek için de söz konusu olduğu söylenebilir.

Meme-örnek mesafesi, su jetinin malzemeye temas ettiği alanın genişliğini belirlemesi açısından önemli bir parametredir. Su çıkışının gerçekleştiği açıklığı terk eden su+aşındırıcı karışımı, malzemeye doğru yol alırken karışımın çapı genişler. Malzemeye temas ettiği an en geniş çapa ulaşır. Artan meme-örnek mesafesi değeri, su jetinin malzemeye temas ettiği andaki çapının büyümesi anlamına gelmektedir. Jet çapının büyümesinin sonucunda aşındırıcı tanecikleri daha geniş bir alanda dağılırlar. Artan meme-örnek mesafesi, dağılıma/yayıma durumuna bağlı olarak, su jetinin temas ettiği yüzeyde birim alana uygulayacağı darbe etkisinin azalmasına neden olur. Bağlı olarak kesilen yüzeylerde kalite düşüşlerine, ya da pürüzlülük artışlarına sebep olabilir. Çalışılan örneklerin yüzey pürüzlülük değerleri artan mesafe ile birlikte artış göstermiştir. Farklı malzemelerle gerçekleştirilen pek çok çalışma düşük meme-örnek mesafesi seçiminin, yüzey kalitesinin iyileştirilmesinde uygun seçenek olmasının yanı sıra, örnek kesme derinliği ve kesme genişliği üzerinde de olumlu etki yarattığını doğrulamıştır (Arola ve Ramulu, 1996; Momber ve Kovacevic, 1997; Khan vd., 2005; Ma ve Deam, 2006).



Şekil 10. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin aşındırıcı boyutuna göre değişimi.

Figure 10. Variation of surface roughnesses with the abrasive size.

### Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncının artışıyla genel olarak, örnek yüzey pürüzlülükleri de artmıştır (Şekil 9). Ancak özellikle Azul Platino'da 200 MPa basınçta diğer örneklerin aksine daha yüksek pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Her üç örnekte değişimi karakterize eden aralık 200–300 MPa aralığıdır. Bu aralıkta her üç örneğin pürüzlülüğü de belirgin artışlar göstermiştir. Bu aralığın dışında pürüzlülük değeri sınırlı bir aralıkta artış göstermektedir (Azul Platino'da 200 MPa değeri hariç).

Çalışma basıncı pek çok araştırmada önemli bir çalışma konusu olmuştur. Shipway vd. (2005), çalışma basıncının malzeme yüzey pürüzlülüğünden çok, yüzeyde oluşan dalgalılık ya da çiziklik üzerinde daha etkin olduğunu saptamışlardır. Artan çalışma basıncı, yüzeydeki dalgalılık oranını arttırırken, yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirgin bir etkiye neden olmamaktadır. Bir başka çalışmada, düşük çalışma basınçlarında kesilen derinliğin üst kısımlarında daha iyi yüzeylerin elde edildiği belirlenmiştir (Külekçi ve Akkurt, 2001). Ancak bu durum, önemli oranda aşındırıcı tanecik hızı ve birim alana çarpan tanecik çapı ile ilgilidir. Bu sonucu destekler nitelikte olan bir çalışmada da, düşük hıza sahip taneciklerin yüzeyde daha az hasar meydana getireceği ve bu taneciklerin enerjilerini oldukça hızlı bir şekilde kaybedeceğinden kesilen derinliğin üst kısımlarının (derinliğinin) alt kısımlarına nazaran artacağı ifade edilmiştir (Burnham



ve Kim, 1989). Bunun sonucu olarak, kesme-aşınma bölgesi derinliği deformasyon aşınma bölgesine oranla daha fazla olacaktır. Ayrıca, kesme sürecinde hedefe yönlendirilen tane-ciklerden bir kısmı malzemeden parçacıklar koparırken, geride kalanlar yüzey bitirme işlemini gerçekleştirirler. Bu şekilde düşük basınç altında daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir. Şekil 9 incelendiğinde de, benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Düşük basınçlarda daha az olan örnek yüzey pürüzlülükleri, artan basınçla birlikte kötüleşmeye başlamıştır.

### Aşındırıcı Tane Boyu Değişimi

Teminindeki güçlükler nedeniyle aşındırıcı boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi iki farklı aşındırıcı boyutu kullanılarak araştırılmıştır. Bu deneylerde, tüm örneklerin yüzey pürüzlülüğü ince boyutlu aşındırıcı ile artış göstermiştir (Şekil 10).

Su jeti hüzmesindeki büyük boyutlu aşındırıcı tanecikleri ağır olmaları ve hareket yönlerini koruyabilmeleri nedeniyle daha hızlı bir kesme işlemi gerçekleştirirler (Zeng ve Kim, 1996). Büyük boyutlu aşındırıcı tanecikleri ile yapılan kesme işlemlerinde malzeme kesme aşınma bölgesi derinliklerinin daha fazla olmasına rağmen, elde edilen yüzey kalitesi daha kaba olabilmektedir (Külekçi ve Akkurt, 2001). Buna karşın, Şekil 10 incelendiğinde tüm kaya örnekleri için ince boyutlu aşındırıcı ile daha yüksek pürüzlülük değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Bu durumun malzeme tane boyu ile aşındırıcı tane boyutu arasındaki ilişki ve/veya kayacın fiziko-mekanik özellikleri ve heterojen yapısı ile ilgili olabileceği düşünülmektedir.

### SONUÇLAR

Su jeti ile elde edilen kesme yüzey kalitesi, malzemenin teknolojik olarak kalitesinin ölçüsü olup, birçok parametrenin denetimi altındadır. Kesme parametreleri ile yüzey pürüzlülüğü arasında önemli bir ilişki vardır. Kabul edilebilir bir yüzey kalitesi için uygun kesme parametrelerinin belirlenmesinde kesik derinliği ve kesik genişliği gibi yüzey pürüzlülüğünün de dikkate alınması zorunludur. Aşındırıcı katkılı su jeti ile kesmede, denetlenebilir bazı kesme parametrelerinin, mal-

zeme yüzey pürüzlülüklerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- i. Yanal ilerleme hızının artışı yüzey pürüzlülüğün artışına neden olurken, aşındırıcı besleme miktarındaki artış belli bir değere kadar yüzey kalitesini iyileştirmiştir. Ancak sınır değerden sonra yüzey kötüleşmesi meydana gelmiştir.
- ii. Kesilen malzeme ile su jeti çıkışı arasındaki mesafenin artması, örnek yüzey pürüzlülüklerinde belirgin bir şekilde kötüleşmelerle sonuçlanmıştır.
- iii. Su jeti basıncının artması, kesme yüzeyi alt bölgelerinde oluşan dalgalılık/çiziklik oranını arttırmakla birlikte, üst bölgelerdeki yüzey pürüzlülük değerlerinin de artmasına neden olmuştur. Ek olarak, ince boyutlu aşındırıcı ile gerçekleştirilen deneylerde, daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.
- iv. Giresun Vizon ve Azul Platino için en düşük yüzey pürüzlülük değerleri; 100 mm/dk yanıl ilerleme hızı, 250 gr/dk aşındırıcı besleme miktarı, 2 mm meme-örnek mesafesi, 250 MPa çalışma basıncı ve 80 mesh aşındırıcı boyutu'nda elde edilmiştir. Öte yandan, Aksaray Yaylak için en düşük yüzey pürüzlülük değerleri; 100 mm/dk yanıl ilerleme hızı, 300 gr/dk aşındırıcı besleme miktarı, 4 mm meme-örnek mesafesi, 200 MPa çalışma basıncı ve 80 mesh aşındırıcı boyutu'nda elde edilmiştir.
- v. Su jeti ile kesmede elde edilen malzeme yüzey kaliteleri, kesme parametrelerinin yanı sıra, kesilen malzemenin özellikleri ile de doğrudan ilişkilidir. Özellikle granit gibi çok fazlı (çok mineralli) malzemelerin su jetinin aşındırma etkisine karşı tepkisini/davranışını denetleyen parametrelerin arasında, malzeme (graniti) oluşturan bileşenlerin (minerallerin) tip ve geometrik özelliklerinin (tane boyu dağılımı, yuvarlaklık-köşellilik gibi) de etkisi vardır. Ayrıca, malzemenin fiziko-mekanik özellikleri de malzeme davranışını etkileyen diğer faktörler arasındadır. Bu nedenle, aşındırıcı su jeti ile kesmede granit gibi heterojen malzemeler ile çalışılması durumunda, malzeme özelliklerinin de belirlenmesi, bu konuda ileri-ki çalışmalara ışık tutacaktır.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından desteklenen 108M370 kod no.lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR

- Akkurt, A., 2009. AISI 1030 çeliğinin aşındırıcı su jeti ile kesilmesinde yüzey pürüzlülüğünün ve kesme önü geometrisinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (1), 1-11.
- Akkurt, A., Külekçi, K. M., Seker, U., and Ercan F., 2004. Effect of feed rate on surface roughness in abrasive waterjet cutting applications. Journal of Materials Processing Technology, 147, 389-396.
- Arola, D., and Ramulu, M., 1996. A study of kerf characteristics in abrasive waterjet machining of graphite/epoxy composite. Transaction of the ASME, 118 (2), 256-265.
- Burnham, C.D., and Kim, J., 1989. Statistical characterization of surface finish produced by a high pressure abrasive waterjet. Proceedings of the 5th US Waterjet Conference, Toronto-Canada, pp.169-174.
- Canıyılmaz E. ve Kutay, F., 2003. Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18 (3), 51-63.
- Chen, D., Sarumi, M., Al-Hassani, S.T.S., Gan, S., and Yin, Z., 1997. A model for erosion at normal impact. Wear, 205, 32-39.
- Chen, F. L., and Siores, E., 2003. The effect of cutting jet variation on surface striation formation in abrasive waterjet cutting. Journal of Material Processing Technology, 135, 1-5.
- Chen, F. L., Wang, J., Lemma, E., and Siores E., 2003. Striation formation mechanisms on the jet cutting surface. Journal of Materials Processing Technology, 141, 213-218.
- Duflou, J. R., Kruth, J.P., and Bohez, E.L., 2001. Contour cutting of pre-formed parts with abrasive waterjet using 3-axis nozzle control. Journal of Materials Processing Technology, 115, 38-43.
- Geren, N. ve Tunç, T., 2008. Su jeti kesme sistemlerinde kullanılan basınç arttırıcılarda gerilme analizleri ve tasarım sınırları. 13. Uluslararası Makine Tasarımı ve İmalatı Kongresi (UMTİK), İstanbul, s. 609-618.
- Gudimetla, P., Wang, J., and Wong, W., 2002. Kerf formation analysis in abrasive waterjet cutting of industrial ceramics. International Journal of Materials Processing Technology, 128, 123-129.
- Hasçalık A., Çaydaş U., and Gürün H. 2007. Effect of traverse speed on abrasive waterjet machining of Ti-6Al-4V alloy. Materials and Design, 28, 1953-1957.
- Huang, Z.C., Hou, G.R., Wang, J., and Feng, X.Y., 2006. The effect of high pressure abrasive water jet cutting parameters on cutting performance of granite. Key Engineering Materials, 304-305, 560-564.
- Karakurt, İ., 2007. Aşındırıcı su jeti kesme sistemlerinin kayaç kesme performanslarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon (yayımlanmamış).
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2010. Su jeti teknolojisinin madencilik sektöründeki uygulamalarının değerlendirilmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 (1), 113-121.
- Kasman, Ş., 2009. Lazer mikro işleme parametrelerinin yüzey kalitesine etkisinin deney tasarım yöntemiyle belirlenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, s. 5.
- Khan, A. A., Munajat, B.N., and Tajudin, H.B., 2005. A study of abrasive waterjet machining of aluminium with garnet abrasives. Journal of Applied Sciences 5 (9), 1650-1654.
- Külekçi, K. M., 2002. Process and apparatus developments in industrial waterjet applications. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, 1297-1306.

- Külekcı, K. M. ve Akkurt, A., 2001. Aşındırıcılı su jeti ile kesilerek elde edilen yüzey kalitesinin değerlendirilmesi. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5 (2), 13-24.
- Liu, Y., and Chen, X., 2004. A study on the abrasive water jet cutting for granite. Key Engineering Materials, 257-258, 527-532.
- Ma, C., and Deam, R. T., 2006. A correlation for predicting the kerf profile from abrasive water jet cutting. Experimental Thermal and Fluid Science, 30, 337-343.
- Miranda, M.R., and Quintino, L., 2005. Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones. Materials Characterization, 54, 370 – 377.
- Momber, W. A., and Kovacevic, R., 1997. Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials. International Journal of Rock Mechanic and Mining Science, 34, 17-25.
- Momber, W. A., Mohan, S. R., and Kovacevic, R., 2002. Fracture range detection in hydro-abrasive erosion of concrete. Wear, 253, 1156-1164.
- Ojmertz, K.M.C., 1993. Abrasive waterjet milling: an experimental investigation. Proceedings of the 7th US Waterjet Conference, M. Hashish (ed.), Waterjet Technology Association, St. Louis, pp. 777-791.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. ve Ürgen, M., 2004. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. İTÜ Mühendislik Dergisi, 3 (6), 117-128.
- Shipway, P.H., Fowler, G., and Pashby, 2005. Characteristics of the surface of titanium alloy following milling with abrasive waterjets. Wear, 258, 123-132.
- Singh, P. L., Chen, W.L., and Munoz, I., 1991. Comprehensive evaluation of abrasive waterjet cut surface quality. 6th American Water Jet Conference, Houston, USA, pp. 139-161.
- Vijay, M. M., 1995. Considerations in the use of high speed water jets for deep slotting of granite. Gas Dynamics Laboratory, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario Canada (yayınlanmamış rapor).
- Wakuda, M., Yamauchi, Y., and Kanzaki, S., 2003. Material response to particle impact during abrasive jet machining of alumina ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 132, 177-183.
- Yazıcıoğlu, O., Kurt, M. ve Çetinkaya, Y.U., 1993. Sert parçaların kesilmesinde basınçlı su jetinin kullanılması. 6. Makine Teorisi Sempozyumu, Trabzon, 249-258.
- Zeng, J., and Kim, T.J., 1996. An erosion model in polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting. Wear, 193, 207-217.
- Zhang, Z. J., Chen, C. J., and Kirby, D. E., 2007. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. Journal of Materials Processing Technology, 184, 233-239.

