

AŞINDIRICI SU JETİ İLE KESMEDE ÇALIŞMA PARAMETRELERİNİN GRANİT KERF AÇISINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Investigation of Effect of the Process Parameters on Kerf Angle of the Granite in Abrasive Waterjet Cutting

Geliş (received) 18 Ocak (January) 2010; Kabul (accepted) 10 Mart (March) 2010

Gökhan AYDIN(*)
İzzet KARAKURT(**)
Kerim AYDINER(***)

ÖZET

Yeni ve alternatif bir kesme yöntemi olan aşındırıcı su jeti ile kesme, kayaç, çelik, alüminyum gibi sert ve dayanıklı malzemelerin kesilmesi ve işlenmesinde etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Yöntemde malzeme işleme kalitesi, kesilen kanalın geometrisi ile karakterize edilir. Kerf açısı, kesme kanalı girişinde oluşan eğimin ölçüsü olarak ifade edilir ve kesme kanalının düzensiz olması açısından istenmeyen bir parametredir. Bu çalışmada, kontrol edilebilir bazı çalışma parametrelerinin malzeme kerf açılarına etkisi araştırılmıştır. Granit örneklerin kullanıldığı deneysel çalışmalar, Taguchi deney tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; yüksek kesme hızları ve meme-örnek mesafelerinde, örnek kerf açılarında artış meydana gelmiştir. Çalışma basıncındaki artan değişim, beklenenin aksine örnek kerf açılarını arttırmıştır. Öte yandan aşındırıcı besleme miktarındaki artış, örnek kerf açılarının düşmesi yönünde etki etse de bu etki belirgin bir şekilde meydana gelmemiştir. Ayrıca, ince boyutlu aşındırıcı ile yüksek kerf açıları elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Aşındırıcı Su jeti, Granit, Kerf Geometrisi, Kerf Açısı

ABSTRACT

Abrasive waterjet, a new and alternative cutting method, is effectively used in cutting and machining of hard and strong materials such as rock, steel, aluminium. The quality of machining processes in the method is characterized by the geometry of cut line. Kerf angle is defined as a measurement of inclination occurred at the entry of cut line and undesirable parameter in terms of irregularity of cut line. In this study, effect of some controllable process parameters on kerf angle of the material was investigated. The experimental studies using granite specimens were carried out based on the Taguchi orthogonal experimental design. As a result of the study, kerf angles of specimens increased at high traverse speeds and standoff distances. Increasing of water pressure resulted in increases of kerf angles of specimens contrary to expectations. On the other hand, increasing the abrasive flow rate decreased the kerf angles in insignificant amounts. Moreover, higher kerf angles were obtained with the fine abrasive size.

Keywords: Abrasive Water Jet, Granite, Kerf Geometry, Kerf Angle

(*) Arş. Gör. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, TRABZON

(**) Arş. Gör. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Böl., TRABZON karakurt@ktu.edu.tr

(***) Yard. Doç. Dr. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Müh. Fak., Maden Mühendisliği Bölümü, TRABZON

1. GİRİŞ

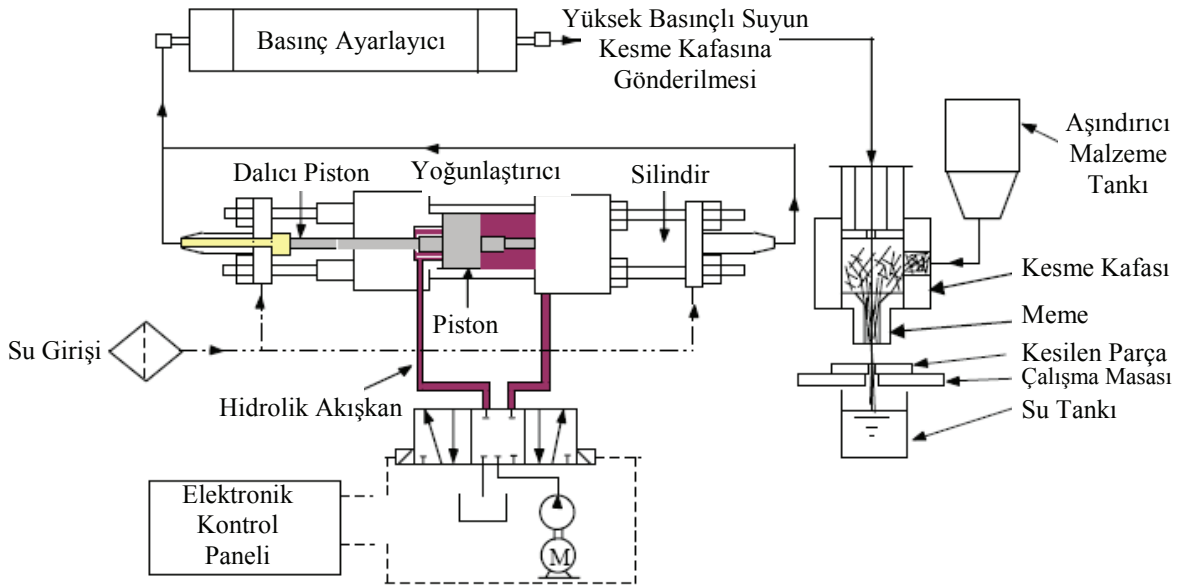
Suyun aşındırma etkisi yıllardır bilinmesine rağmen, kesme ve işleme uygulamalarındaki kullanımı son birkaç yılda hız kazanmıştır. Su jeti ile kesme yöntemi, düşük kesme kuvveti gerektirmesi, esnek ve çok yönlü kesmeye olanak sağlaması, kesme anında ısıl problem oluşturmaması gibi belirgin avantajları nedeniyle hemen her alanda kullanılabilir (Shanmugam vd, 2002).

Klasik bir su jeti kesme sisteminde yüksek basınç ve hızlar, belli sistem elemanları tarafından sağlanır (Yazıcıoğlu vd, 1993). Bu sistem elemanlarını başlıca; basınç ünitesi, aşındırıcı ünitesi, kesme kafası ve kontrol ünitesi olarak dört ana grupta toplamak mümkündür. Sistemin şematik bir görünümü Şekil 1'de verilmiştir.

Su jeti kesme sistemlerinin kayaçların kesiminde kullanılabilirliğini araştıran az sayıda araştırmacı, başlıca kesme mekanizmasının açıklanması ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi üzerinde durmuşlardır (Vijay, 1995; Huang vd, 2006; Bortolussi vd, 1988; Karakurt ve Aydiner, 2007; Karakurt vd, 2009).

çalışmalarda pompa basıncı, meme çapı ve kesme hızı parametrelerinin değişimini inceleyen araştırmacılar, yüksek basınçlı su jetlerinin granitlerin (ya da kayaçların) kesilmesinde ticari olarak pratik bir kesme yöntemi olduğunu, ayrıca aşındırıcı ilavesinin granit kesme performansını artırdığını belirlemişlerdir. Hagan (1992), şeyl ve kumtaşı örneklerle gerçekleştirdiği araştırmada, çalışma parametrelerinin değişiminin kesme performansı üzerindeki etkisini araştırmış ve en etkin parametrenin jet basıncı olduğunu belirlemiştir. Miranda ve Quintino (2005), kalkerli kayaçlarına aşındırıcı su jeti ile kesilebilirliği üzerinde malzeme özelliklerinin etkisini araştırmışlardır. Köken, yapı ve mekanik özellikleri farklı iki kireç taşı ile yapılan deneyler sonucunda iki kayacın farklı davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. Liu ve Chen (2002) ise granit örneklerini kullandıkları çalışmalarında pompa basıncı, aşındırıcı miktarı, kesme hızı ve jet çapı gibi parametrelerin kesme mekanizması ve kesme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Literatürde su jetinin malzemelerin kesilebilirliğinde kullanımına yönelik gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür. Ancak, yöntemin kullanımını



Şekil 1. Su jeti kesme sistemi şematik görünümü (Akkurt vd, 2004).

Yöntemin kayaçların kesilmesinde kullanılabilirliği konusunda erken dönem çalışmalarından birisi Bortolussi vd (1988) tarafından gerçekleştirilmiştir. Granit örneklerin kullandığı

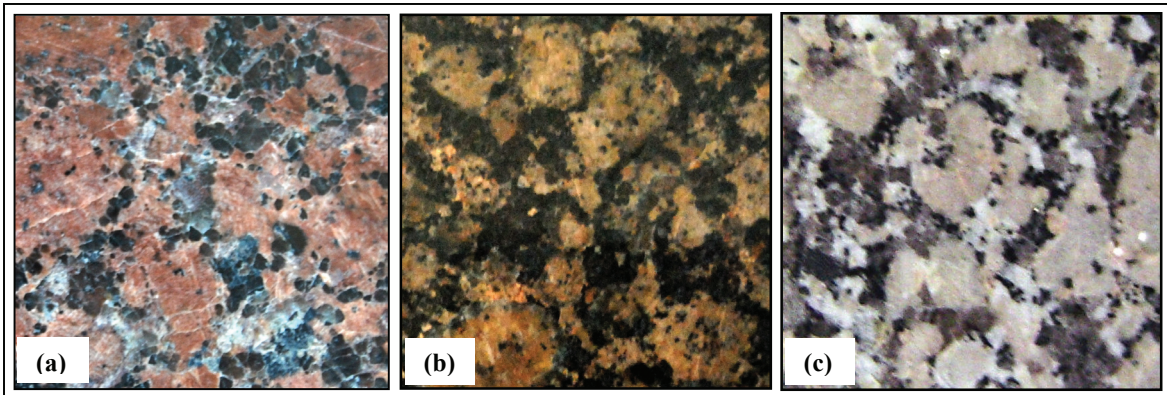
sınırlayan önemli etkenler arasında olan kerf geometrisinin iyileştirilmesine yönelik az sayıda çalışma mevcuttur. Chen vd (1996)'nin seramik katkılı alüminyum malzeme kullandıkları

çalışmalarında, aşındırıcı su jeti kesme performansı optimizasyonu için kesilen örneklerin kerf karakteristiklerini analiz etmişlerdir. Bir başka çalışmada, aşındırıcı su jeti ile kesilen grafit kompozitlerin kerf geometrileri, kerf özellikleri ve kesme önü karakteristikleri analiz edilmiştir (Arola ve Ramulu, 1996). Heterojen yapıları nedeniyle kesilip işlenmesi oldukça zor olan tabakalı kompozitlerin kullanıldığı bir çalışmada da, su jeti ile malzeme kesmede önemli bir kesme performans göstergesi olan kerf açısı analizi yapılmıştır. Çalışmada kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi ve çalışma basıncı değişiminin örnek kerf açıları üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Shanmugam ve Masood, 2009). Shanmugam ve arkadaşlarının (2002), su jeti ile kesme de oluşan kerf geometrisini iyileştirmeye yönelik yaptıkları bir çalışmada, memeye (nozul) eğim verilmesinin örnek kerf açılarındaki belirgin iyileştirmeler yaptığı görülmüştür.

Bu çalışmada, aşındırıcı su jeti çalışma parametrelerinden kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi, çalışma basıncı ve aşındırıcı boyutu değişiminin örnek kerf açıları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Granit örneklerin kullanıldığı çalışmada, aşındırıcı su jeti çalışma parametresi-kayaç kerf açısı arasındaki ilişki tanımlanmaya çalışılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme



Şekil 2. Deneylerde kullanılan granit örneklerine ait görüntüler a) Carmen Red, b) Baltic Brown, c) Rosa Minho.

Deney çalışmalarında, Türkiye'de faaliyet gösteren özel bir kuruluştan temin edilen ve 3x10x20 cm ebatlarında olan Carmen Red

(Finlandiya merkezli), Baltic Brown (Finlandiya merkezli) ve Rosa Minho (İspanya merkezli) ticari isimli granit örnekler kullanılmıştır. Örneklere ait fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 1'de verilmiştir. Her üç örnekte genel olarak iri boyutlu minerallerden oluşmuştur. Örneklere ait bir görüntü Şekil 2'de verilmiştir. Çalışmada kullanılan aşındırıcı malzeme cinsi ise garnet/granat olup sertliği 7,5–8 Mohs'tur. Kimyasal olarak, % 36 FeO, % 33 SiO₂, % 20 Al₂O₃, % 4 MgO, % 3 TiO₂, % 2 CaO ve % 2 MnO₂'den oluşmaktadır.

Deneylerde kullanılan örneklerin mineralojik bileşimleri, ince kesit üzerinden belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca gerek ince kesit analizleri gerekse de görüntü analiz yazılımı (DeWinter Material Plus 4.1) kullanılarak yapılan tane boyut dağılımı ve faz analizleri ile örneklerin tane boyut dağılımlarının genellikle 20 mm'ye yakın olduğu belirlenmiştir. Mineralojik analize ek olarak görüntü analiz yazılımı ile yapılan analizlerden elde edilen sonuçların mineralojik analizle uyumlu olduğu görülmüştür.

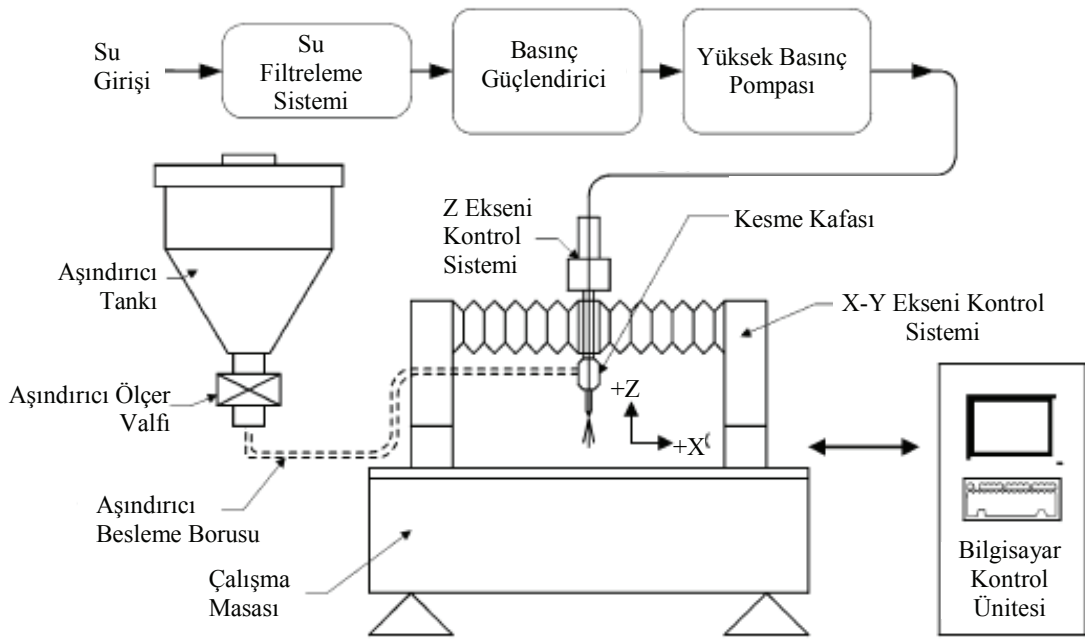
2.2. Deney Düzeneği

Çalışmalarda, üç eksenli hareket kabiliyetine sahip, bilgisayar kontrollü bir su jeti makinası kullanılmıştır. Kesme deneyleri İstanbul'da faaliyet gösteren özel bir firmada gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ait şematik bir görünüm Şekil

3'de verilmektedir. Ayrıca, çalışmada kullanılan su jeti makinasına ait özellikler de Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 1. Deneysel Çalışmalarında Kullanılan Örneklerle Ait Özellikler

	Özellik	Rosa Minho	Carmen Red	Baltic Brown
Fiziksel ve mekanik	Tane boyut aralığı (mm)	0,2–22	0,2–20	0,6–20
	Su emme oran (%)	0,30	0,18	0,22
	Birim hacim ağırlık (gr/cm ³)	2,72	2,64	2,68
	Basınç dayanımı (MPa)	107	184	194
	Eğilme dayanımı (MPa)	15	13	12,7
Mineralojik bileşim (%)	Alkali Feldspat	54	47	57
	Kuars	29	37	21
	Plajiyoklaz	10	10	15
	Biyotit	5	5	3
	Diğer	2	1	4



Şekil 3. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneğinin şematik görünümü (Duflou vd, 2001'den değiştirilerek).

2.3. Deneysel Tasarımı

Klasik deney tasarım yöntemleri, faktörler arasındaki etkileşimin göz ardı edilmesine ve deney sonuçlarının yorumlanmasında yanıltıcı bilgilerin 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. Bu tasarım tekniği, standart ortogonal dizinlerden oluştuğu ve Latin kare kökenli olduğu için çoğu zaman "Latin Kare Tasarımı" ile karıştırılmaktadır. Aslında, Latin Kare Tasarımında; tüm etkenler için düzey sayıları eşit olup, bir etkenin bir düzeyi diğer etken düzeyleri ile yalnız bir kez birlikte uygulanmaktadır. Bu tasarımda faktör etkileşimleri minimum düzeydedir ya da ihmal edilmektedir (Colbourn ve Dinitz, 2001; Ghandehari vd, 2005).

Bu çalışmadaki deney faktörleri (çalışma parametreleri) literatüre uygun olarak kesme hızı, aşındırıcı besleme oranı, meme-örnek mesafesi, çalışma (pompa) basıncı ve aşındırıcı boyutu seçilmiştir. Aşındırıcı boyutu hariç diğer çalışma parametreleri dört farklı seviyede çalışılmıştır. Aşındırıcı boyutu etkisi ise boyut teminindeki zorluklar nedeniyle iki farklı değerde araştırılmıştır.

Çizelge 2. Deney Çalışmalarında Kullanılan Su Jeti Makinasına Ait Özellikler

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

Çalışma parametreleri ve seviyeleri dikkate alındığında, Taguchi deney tasarım tekniğinin öngördüğü standart ortogonal dizinlerden $L_{16}(4^{4*}2^1)$ dizini, deney tasarımı olarak seçilmiştir. $L_{16}(4^{4*}2^1)$ ortogonal dizinine göre tasarlanmış deneyin, faktör ve seviyeleri Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. $L_{16}[4^{4*}2^1]$ Ortogonal Dizinine Göre Tasarlanmış Deneyin Faktör ve Seviyeleri

DENEY NO	FAKTÖR SAYISI				
	Kesme (İlerleme) Hızı (mm/dk)	Aşındırıcı Besleme Oranı (gr/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

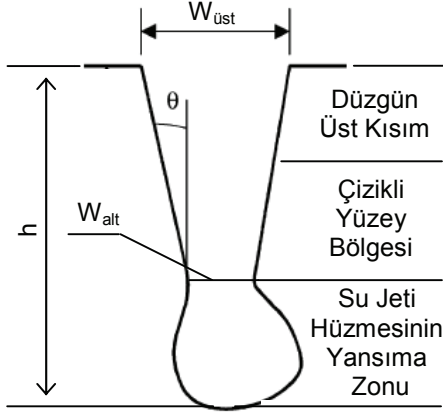
2.4. Kerf Açısı Ölçümleri

Su jeti ile kesmede bir kesme performans ölçütü olan kerf açısı, malzemenin kesme aralığında (kesme kenarı giriş kısmında, Şekil 4) meydana gelen eğimin ölçüsü olarak ifade edilir ve kesme geometrisini ifade eden önemli bir parametredir (Wang ve Liu, 2006; Wang ve Guo, 2003). Aşındırıcı su jeti ile granit örnekler, uzunlukları boyunca beş eşit parça halinde kesilmiş ve her bir örnekten Şekil 4'de gösterildiği gibi dört farklı ölçüm alınmıştır. Böylelikle ölçümden kaynaklanan hatanın minimuma indirilmesi sağlanmıştır. Örnek kerf açıları ise aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{h} \right) \quad (1)$$

Burada;

- $W_{üst}$ = Üst yarık genişliği
- W_{alt} = Alt yarık genişliği
- h = Kesme derinliği
- θ = Kerf açısı

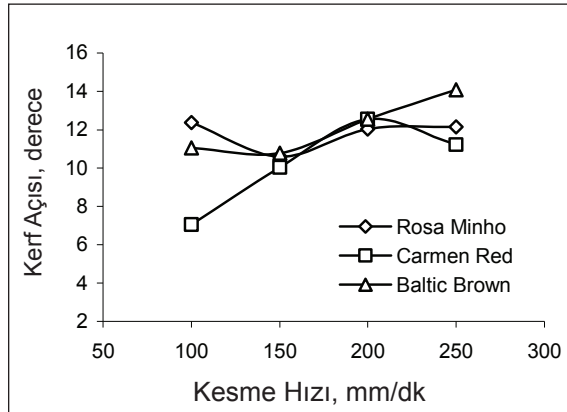


Şekil 4. Örnek kerf açılarının ölçümü (Wang, 1999; Wang ve Guo, 2003).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Kesme Hızı Değişimi

Granit örneklerin kesme hızına bağlı kerf açılarındaki değişimi Şekil 5'de verilmiştir. Şekil incelendiğinde, kesme hızındaki artışların genel olarak örnek kerf açılarını artırdığı söylenebilir. Ancak, kerf açılarındaki artan değişim kayaca göre farklılık göstermiştir. Baltic Brown ve Rosa Minho'da kerf açıları 100–150 mm/dk hızlarında azda olsa bir düşüş göstermiş bundan sonraki ilk aralıkta her iki örneğin de kerf açıları artmıştır.



Şekil 5. Örnek kerf açılarının kesme hızına bağlı değişimi.

200–250 mm/dk aralığında Rosa Minho kerf açısı sabit ya da sabite yakın bir değişim gösterirken Baltic Brown için artış, düzenli olarak devam etmiştir. Carmen Red'in kerf açısı ise 100–150

ve 200 mm/dk aralığında düzenli olarak bir artış göstermiş bu aralıktan sonra da kerf açısında bir düşüş meydana gelmiştir.

Yüksek kesme hızlarında, düzensiz kesme yüzeylerinin oluşması buna bağlı olarak da malzeme kerf açılarının artması kaçınılmazdır (Liu, 2004). Çünkü yüksek kesme hızları, malzemenin su jetinin aşındırma/kesme etkisine maruz kaldığı süreyi azaltır ve malzeme üzerindeki bir noktanın daha az süre su jeti etkisinde kalmasına sebep olur. Böylelikle kesilen yüzeyde birim alana düşen partikül sayısı azalır ve buna paralel olarak düzensiz kesme yüzeyleri elde edilir. Geriden gelen partiküller daha önceki aşamalarda kabaca kesilen kısımları düzeltme için yeterince teması sağlayamazlar (Xu, 2005; Chen vd, 1997; Külekçi ve Akkurt, 2001; Liu, 2004). Ayrıca, yüksek hızlardaki su jetinin geri yansıması malzeme kesme geometrileri üzerinde daha fazla zarar verici etkilerin oluşmasına sebep olur. (Xu ve Wang, 2006; Liu, 2004).

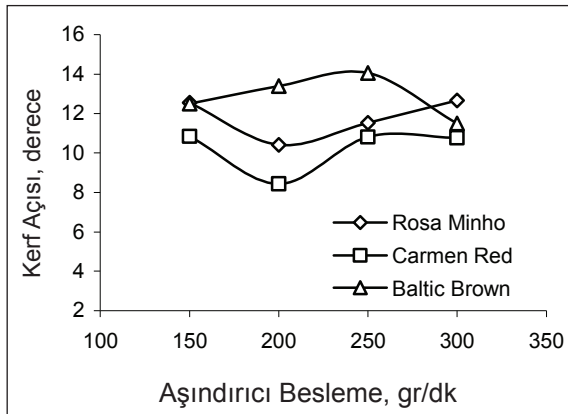
Literatürde farklı türden malzemelerle gerçekleştirilen deneylerde de kesme sonrası malzeme kerf açılarının artan hızla beraber artış gösterdiği belirlenmiştir (Shanmugam ve Masood, 2009; Shanmugam vd, 2008; Gudimetla vd, 2002; Wang ve Guo, 2003). Kerf açılarındaki artışın kesilen malzemenin su jeti hızmesine maruz kalma süresinin direkt bir sonucu olduğunu ifade eden araştırmacılar, düzgün kesme yüzeylerinin ve düşük kerf açılarının elde edilmesi için düşük kesme hızlarında kesme yapılmasını önermişlerdir.

3.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Aşındırıcı besleme miktarındaki artan değişim, örnek kerf açıları üzerinde net bir azalma ya da artmaya sebep olmamıştır. Şekil 6, aşındırıcı miktarındaki değişimin örnek kerf açıları üzerindeki değişimini göstermektedir. Buna göre Rosa Minho'nun ve Carmen Red'in kerf açıları, 150–200 gr/dk aralığında önce azalmış sonraki aralıkta artış göstermiştir. 250–300 gr/dk aralığında ise Rosa Minho'nun kerf açısındaki artış devam ederken Carmen Red'in kerf açısı, azalma eğiliminde olmuştur. Ancak bu azalma ihmal edilebilecek düzeydedir. Baltic Brown'un kerf açısındaki değişim ise 150 gr/dk'dan 250 gr/dk'ya kadar artmış bu değerden sonrada azalma göstermiştir.

Aşındırıcı su jeti ile kesmede su jetine ilave edilen aşındırıcı partiküllerinin artması birim alana düşen partikül sayısının artması anlamına gelecektir. Bu da malzemeden daha fazla parçacık kopmasını sağlayarak nispeten düzenli bir kesme geometrisi elde edilmesine yol açacaktır. Böylelikle kesme geometrisinin bir göstergesi olan kerf açılarının da düşmesi beklenecektir (Shanmugam ve Masood, 2009).

Ancak, çalışılan örneklerin kerf açılarındaki değişim incelendiğinde artan aşındırıcı miktarına göre farklı davranışlar içinde oldukları görülmektedir. Bu farklı davranışlar kayaç özellikleri (tane yapısı ve şekli, taneler arası bağ vs.) ile ilişkili olduğu kadar su jeti kesme mekanizması ile de yakından ilgilidir. Malzeme özelliklerinin de dikkate alınarak yapılan bir çalışmada, artan aşındırıcı miktarı malzeme kerf açılarındaki azalmaya yol açsa da bu azalma ihmal edilebilecek kadar önemsiz bir seviyede olmuştur (Shanmugam vd, 2008). Araştırmacılar, malzemenin özellikleri nedeniyle bu tür durumların ortaya çıkabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 6. Örnek kerf açılarındaki değişimin aşındırıcı besleme miktarına bağlı olarak değişimi.

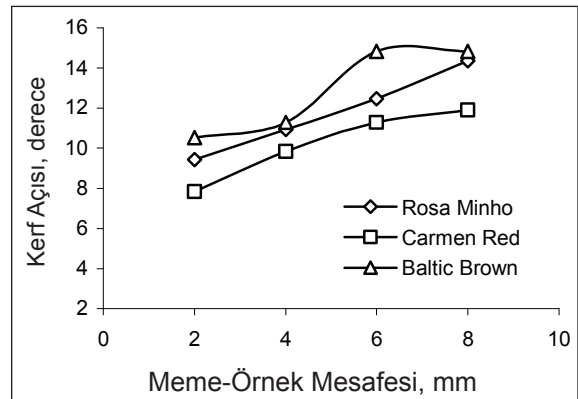
Ayrıca, malzemeden parçacık koparılması için su jetinden aşındırıcı partiküllerine iletilen kritik bir enerjinin olduğunu, bu enerjinin altında bir değerde aşındırıcı miktarının artırılmasının malzeme kerf açıları üzerinde bir etkiye sahip olmayacağı da ifade edilmiştir. Alüminyum seramiklerin kullanıldığı çeşitli araştırmalarda, aşındırıcı besleme miktarının diğer çalışma parametreleri kadar malzeme kerf açıları üzerinde etken olmadığı ifade edilmektedir (Liu, 2004; Xu, 2005). Bunun yanı sıra ayrıca, aşındırıcı artışı işletim maliyetlerini artırmak gibi bir dezavantaja da sahiptir.

3.3. Meme-Örnek Mesafesi Değişimi

Kerf açılarındaki en belirgin değişim, meme-örnek mesafesi değişiminde meydana gelmiştir. Her üç örneğin kerf açıları, artan meme-örnek mesafesine bağlı olarak artma eğiliminde olmuştur. En büyük değişim Baltic Brown'da meydana gelirken bunu sırasıyla Rosa Minho ve Carmen Red izlemiştir. Baltic Brown'un kerf açısı, 6–8 mm aralığında azalma ya da sabit kalma eğilimin de olmuştur (Şekil 7).

Su jeti ile kesmede meme-örnek mesafesi, jetin malzemeye temas ettiği mesafe açısından önemli bir parametredir. Jetin meme çıkış anından itibaren çapını genişleterek malzeme yüzeyine temas etmesi, düzensiz kesme yüzeylerinin elde edilmesine yol açmasının yanı sıra kerf geometrisinin de olumsuz etkilenmesine yol açacaktır. Buna bağlı olarak kerf açılarındaki artışlar gözlenecektir (Wang ve Wong, 1997).

Şekil 7 incelendiğinde, örnek kerf açılarındaki artan meme-örnek mesafesine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Meme-örnek mesafesi artışı ile malzeme yüzeyi meme çıkışından itibaren çapı genişleyen bir su jeti huzmesi temasına maruz kalır. Bu da su jetinin malzemeden parçacık koparması için gerekli olan etkin genişliğinin veya çapının değişmesine (büyümesine) neden olur. Su jeti huzmesindeki etkin genişlik (jet çapı), malzemeden parçacık uzaklaştırmada önemli rol oynar (Hashish ve Du Plessis, 1979).



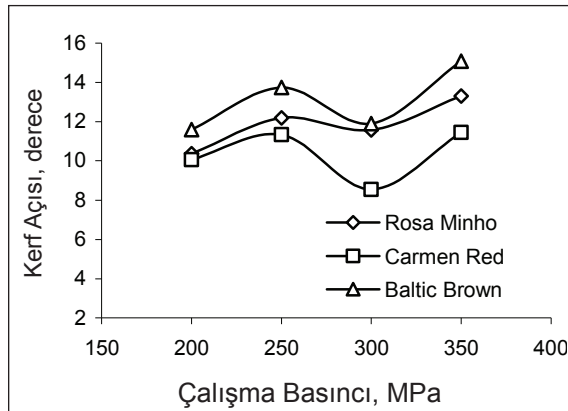
Şekil 7. Örnek kerf açılarındaki değişimin meme-örnek mesafesine bağlı olarak değişimi.

Meme-örnek mesafesinin düşük seçildiği durumlarda, su jetinin etkin genişliği veya çapı küçük olacak ve etkin bir kesme işleminin gerçekleşmesi sağlanacaktır. Dolayısıyla malzeme kerf açılarındaki düşmesi söz konusu olacaktır.

3.4. Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncı etkisinin araştırıldığı deneylerde, örnek kerf açıları artan çalışma basıncına bağlı olarak artma-azalma-artma şeklinde eğilim göstermiştir (Şekil 8). Her üç örneğin kerf açıları 200–250 MPa aralığında artarken takip eden aralıkta kerf açılarında düşme meydana gelmiştir. Bu düşüş, Rosa Minho için çok yavaş gerçekleşmiştir (ve çok keskin bir düşüş de yoktur). Diğer iki örnekteki düşüş daha belirgin olmuştur. 300–350 MPa aralığında her üç örneğin kerf açıları yeniden artmıştır.

Çalışma basıncı, kinetik enerjinin su jeti içerisindeki aşındırıcı partiküllerine iletilmesi açısından önemli bir parametredir. Çalışma basıncının artması, alt ve üst kerf genişliği arasındaki farkı azaltacak yönde etki yapar. Alt ve üst kerf genişliği arasındaki farkın az olması malzeme kerf açılarının düşmesine yol açacaktır. Dolayısıyla, su basıncı artışı genel olarak malzeme kerf açılarındaki düşmesine sebep olur (Shanmugam vd, 2008; Shanmugam vd, 2002).



Şekil 8. Örnek kerf açılarındaki çalışma basıncına göre değişimi.

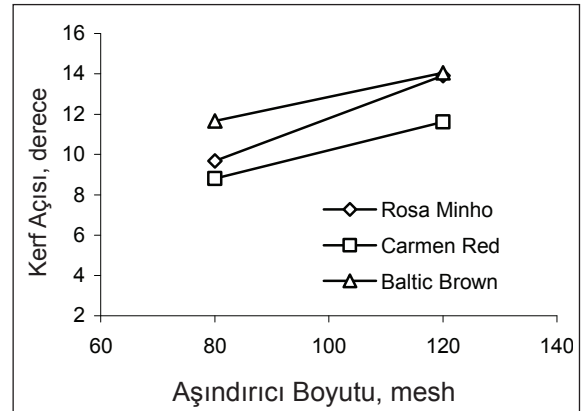
Bu çalışmada kullanılan granit örneklerin kerf açılarındaki artan çalışma basıncına karşı davranışı, genel durumun aksine farklılık arz etmiştir. Malzeme kerf açılarındaki beklenen düşüş 250–300 MPa aralığında gerçekleşmiş sonrasında tekrar artış meydana gelmiştir. Bu durum, sadece su jeti kesme mekanizması değil malzeme özellikleri dikkate alınarak da açıklanabilir. Bir başka deyişle; granit gibi çok mineralli kayaların kesmeye karşı gösterdikleri davranış içerdikleri minerallerin kontrolü altındadır. Dolayısıyla, kesilmenin meydana geldiği hatta yer alan mineral(ler) nedeniyle

malzeme kesilmeye karşı beklenenin aksine sapmalar gösterebilir. Bunun yanı sıra, metalik kaplamalı çelik levhalar kullanılarak yapılan bir çalışmada, çalışma basıncı artışının örnek alt ve üst kerf genişlikleri arasındaki farkı büyüttüğü, bununla birlikte kerf açısını artırma yönünde etki ettiği belirlenmiştir (Wang ve Wong, 1999).

3.5. Aşındırıcı Tane Boyutu Değişimi

Aşındırıcı boyutunun küçülmesi örnek kerf açılarındaki artışına sebep olmuştur (Şekil 9). İnce aşındırıcı boyutunda en yüksek kerf açısı Baltic Brown'da elde edilmiştir. En düşük kerf açısı ise Carmen Red örneğinde meydana gelmiştir.

Aşındırıcı boyutu büyüdükçe, birim alana düşen partikül sayısı düşer. Yapılan çalışmalar, büyük boyutlu aşındırıcı partiküllerin ağır olmaları ve hareket yönlerini korumaları nedeniyle daha hızlı kesme işlemi gerçekleştirdiklerini göstermiştir (Zeng ve Kim, 1996).



Şekil 9. Örnek kerf açılarındaki aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi.

Buna bağlı olarak büyük boyutlu partiküller ile derin kesme aşınma bölgeleri elde edilmiştir. Ancak büyük boyutlu aşındırıcı ile kaba bir kesme yüzeyi oluşması söz konusudur. İnce boyutlu partiküller ile de, dar kesme aşınma bölgeleri elde edilse de daha düzgün kesme yüzeyleri elde edilir. Bununla beraber birim alana düşen partikül sayısının artması ve malzeme özelliklerine bağlı olarak kaba yüzeylerin oluşması beklenebilir (Küleççi ve Akkurt, 2001). Dolayısıyla kerf açılarındaki beklenenin aksine durumların oluşması söz konusu olabilmektedir.

4. SONUÇLAR

Aşındırıcı su jeti ile kesmede, kesme sonrası oluşan kerf açısı, malzeme kesme geometrisine ait özel ve kesme kanalının düzensiz olması açısından istenmeyen bir parametredir. Kesme sonrası malzeme yüzeylerinde oluşan kerf açıları, birçok parametrenin kontrolü altındadır. Kontrol edilebilir bazı çalışma parametrelerinin granit kerf açlarına etkilerinin araştırıldığı çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- i. Kesme hızındaki artış, örneğe göre farklılık gösterse de kerf açılarının artmasına yol açmıştır. Bu artış Carmen Red örneğinde optimum bir değerden sonra yerini düşüşe bırakmıştır.
- ii. Aşındırıcı besleme miktarındaki artış, örnek kerf açılarında belirgin bir değişikliğe sebep olmamıştır.
- iii. Örnek kerf açılarındaki en belirgin değişim, meme-örnek mesafesi değişiminde meydana gelmiştir. Artan meme-örnek mesafesine bağlı olarak her üç örneğin kerf açıları artmıştır.
- iv. Çalışma basıncındaki artan değişim, beklenenin aksine örnek kerf açılarının artmasına yol açmıştır. Belli bir değerden sonra azalma olsa da bu artış devam etmiştir.
- v. İri boyutlu aşındırıcı ile kesilen örneklerde daha küçük kerf açıları elde edilirken ince boyutlu aşındırıcı ile kesilen örneklerin kerf açıları daha büyük olmuştur.
- vi. Su jeti ile kesmede elde edilen kerf açıları, kontrol edilebilir çalışma parametrelerinin yanı sıra kesilen malzeme özellikleri ile de doğrudan ilişkilidir. Özellikle granit gibi taneli yapıdaki kayaların kesme geometrisi bağlı olarak kerf açısı, kayacı oluşturan bileşenlerin de (minerallerin) kontrolü altındadır ve bu bileşen davranışlarının kesme geometrilerinin belirlenmesi açısından tanımlanması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından desteklenen 108M370 Kod No'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR

Akkurt, A., Külekçi, K. M., Seker, U. ve 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 Water Jet Machining of Graphite/Epoxy Composite", *J. Eng. Mater. Technol.* **118(2)**, 256-265.

Bortolussi, A., Yazici, S. ve Summers, D.A., 1988; "The Use of Waterjets in Cutting Granite, 9th International Symposium on Jet Cutting Technology", 4 – 6 October, Sendai – Japan.

Canıyılmaz E. ve Kutay, F., 2003; "Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım", *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Gazi Üniversitesi*, **18(3)**, 51-63.

Chen, L., Siores, E. and Wong, W.C.K., 1996; "Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Materials", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* **36**, 1201-1206.

Colbourn, J.C. and Dinitz, J.H., 2001; "Mutually Orthogonal Latin Squares: A Brief Survey of Constructions", *Journal of Statistical Planning and Inference*, **95**, 9-48.

Duflou, J.R., Kruth, J.P ve 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.

Ghandehari, M., Hatami, H. and Mahmoodian, E.S., 2005; "On the Size of the Minimum Critical Set of a Latin Square", *Discrete Mathematics*, **293**, 121-127.

Gudimetla, P., Wang, J. ve Wong, W., 2002; "Kerf Formation Analysis in the Abrasive Waterjet Cutting of Industrial Ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, **128**, 123-129.

Hagan, P.C., 1992; "The Cuttability of Rock Using a High Pressure Water Jet", *The University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia*.

Hashish, M. and Du Plessis, M.P., 1979; "Prediction Equations Relating High Velocity Jet

- Cutting Performance to Standoff Distance and Multiphases”, *Journal of Engineering for Industry*, **101**, 311-318.
- Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2007; “Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinin Kayaç Kesme Performansları”, *Türkiye 20. Uluslararası Madencilik Kongre ve Sergisi*, 6-8 Haziran, Ankara, 127-134,.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2009; “Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinde Kesme Hızının Kesme Performansına Etkisinin Araştırılması”, *Türkiye 21. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi*, 6–8 Mayıs, Antalya, 347-354,.
- Kasman, Ş., 2009; “Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deneysel Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- Külekçi, K.M. ve Akkurt, A., 2001; “Aşındırıcı Su Jeti İle Kesilerek Elde Edilen Yüzey Kalitesinin Değerlendirilmesi”, *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **5(2)**, 13-24.
- Liu, H., 2004; “A Study of the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Contouring of Alumina Ceramics and Associated Jet Dynamic Characteristics”, PhD Thesis, School of Mechanical, Manufacturing and Medical Engineering, Queensland University of Technology.
- Liu, Y. ve Chen, X., 2004; “A Study on The Abrasive Water Jet Cutting for Granite”, *Key Engineering Materials*, **257-258**, 527-532.
- Miranda, M. R. ve Quintino, L., 2005; “Microstructural Study of Material Removal Mechanisms Observed in Abrasive Waterjet Cutting of Calcareous Stones”, *Materials Characterization*, **54**, 370 – 377.
- Savaşkan, M., Taptık, Y. Ve Ürgen, M., 2004; “Deney Tasarımı Yöntemi ile Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu”, *İTÜ Mühendislik Dergisi*, **3 (6)**, 117-128.
- Shanmugam, D.K. and Masood, S.H., 2009; “An Investigation on Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Layered Composites”, *J. Materials Proc. Tech.*, **209**, 3887-3893.
- Shanmugam, D.K., Chen, F.L., Siores, E., Brandt, M., 2002; “Comparative Study of Jetting Machining Technologies over Laser Machining Technology for Cutting Composite Materials”, *J. Composite Structures*, **57**, 289–296.
- Shanmugam, D.K., J. Wang. and Liu, H., 2008; “Minimisation of Kerf Tapers in Abrasive Waterjet Machining of Alumina Ceramics Using a Compensation Technique”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **48**, 1527-1534.
- Wang, J., 1999; “Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models”, *Int. Journal of Adv. Manufacture Tech.* **15**, 757–768.
- Wang, J. and Guo, D.M., 2003; “The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics”, *Journal of Materials Processing Technology*, **133**, 371-377.
- Wang, J. and Liu, H., 2006; “Profile Cutting on Alumina Ceramics by Abrasive Waterjet, II. Cutting Performance Models”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, **220**, 715-725.
- Wang, J. and Wong, W.C.K., 1997; “Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels”, *Proceedings of 7th International Conference of Manufacturing Engineering*, Cairns, Australia.
- Xu, S. and Wang, J., 2006; “A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Alumina Ceramics with Controlled Nozzle Oscillation”, *Int. Journal of Advanced Manufacture Tech.*, **27**, 693-702.
- Xu, S., 2005; “Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining with Controlled Nozzle Oscillation”, PhD Thesis, School of Engineering Systems, Queensland University of Technology.
- Yazıcıoğlu, O., Kurt, M. ve Çetinkaya, Y.U., 1993; “Sert Parçaların Kesilmesinde Basınçlı Su Jetinin Kullanılması”, *6. Makine Teorisi Sempozyumu*, Eylül 1993, Trabzon.
- Zeng, J. and Kim, T.J., 1996; “An Erosion Model in Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting”, *Wear*, **193**, 207-217.