

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AŞINDIRICI SU JETİ (ASJ) İLE KAYAÇ KESMEDE PARAMETRİK
DEĞİŞİMLERİN VE MALZEME DOKUSAL ÖZELLİKLERİNİN KESME
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Maden Yük. Müh. İzzet KARAKURT

EKİM 2011
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AŞINDIRICI SU JETİ (ASJ) İLE KAYAÇ KESMEDE PARAMETRİK
DEĞİŞİMLERİN VE MALZEME DOKUSAL ÖZELLİKLERİNİN KESME
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Maden Yük. Müh. İzzet KARAKURT

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03.10.2011

Tezin Savunma Tarihi : 21.10.2011

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda
İzzet KARAKURT Tarafından Hazırlanan

AŞINDIRICI SU JETİ (ASJ) İLE KAYAÇ KESMEDE PARAMETRİK
DEĞİŞİMLERİN VE MALZEME DOKUSAL ÖZELLİKLERİNİN KESME
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 04/10/2011 gün ve 1424 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/10/2011 tarihinde yapılan sınavda

DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

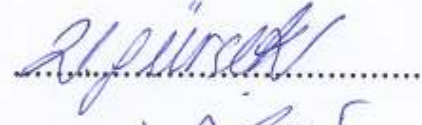
Başkan : Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR



Üye : Prof. Dr. Ayhan KESİMAL



Üye : Doç. Dr. Gençaga PÜRÇEK



Üye : Doç. Dr. Ali Osman YILMAZ



Üye : Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER



Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma; Karadeniz Teknik Üniversitesi (K.T.Ü.) Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Doktora Tezi" olarak hazırlanmıştır. Tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından desteklenen 108M370 Kod No'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden ötürü TUBİTAK'a teşekkür ederim.

Yüksek Lisans ve Doktora eğitimim süresince tez danışmanlığımı üstlenerek, hem akademik çalışmaların yönlendirilmesindeki hem de kişisel katkılarından dolayı hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER'e teşekkürü bir borç bilirim. Yoğun işleri arasında zaman ayırarak, İzmir'den Trabzon'a tez sınavı için gelen Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Ahmet Hakan ONUR'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitesinde yer alarak çalışmalara katkıda bulunan ve Bölüm Başkanı olarak da her türlü desteğini esirgemeyen, tez jürisi üyesi Sayın Prof. Dr. Ayhan KESİMAL'e teşekkürü bir borç bilirim. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçların yorumlanmasında yardımlarını esirgemeyen, özellikle SEM görüntülerinin değerlendirilmesinde yoğun katkısı olan ve tez izleme komitesinde de yer alarak çalışmalara destek veren, tez jürisi üyesi Sayın Doç. Dr. Gençaga PÜRÇEK'e çok teşekkür ederim. Lisans ve lisansüstü çalışmalarım boyunca, kişisel ve akademik olarak desteğini esirgemeyen, tez jürisi üyesi Sayın Doç. Dr. Ali Osman YILMAZ'a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen, kişisel olarak kendisiyle çok şeyi paylaştığım; arkadaşım, meslektaşım, iş arkadaşım, dostum, kardeşim Arş. Gör. Gökhan AYDIN'a teşekkür ederim. Ayrıca; eğitimim süresince emeği geçen bölüm hocalarıma, teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme en derin şükranlarımı sunarım.

İzzet KARAKURT

Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile Kayaç Kesmede Parametrik Değişimlerin ve Malzeme Dokusal Özelliklerinin Kesme Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışmayı; baştan sona kadar danışmanım *Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER*'in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

03/10/2011

İzzet KARAKURT

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Su Jeti ile Kesme Sisteminin Temel Bileşenleri.....	2
1.3. Su Jeti Kesme Sistemi Parametreleri	7
1.2.1. Bağımsız Parametreler	7
1.2.2. Bağımlı Parametreler	8
1.4. Su Jeti ile Kesmenin Temel Esasları.....	8
1.5. Su Jeti ile Kesmede Kerf (YarıK) Karakteristikleri	11
1.5.1. Kerf Profili	11
1.5.2. Yüzey Karakteristikleri	13
1.6. Su Jeti ile Kesmenin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması.....	14
1.7. Su Jeti ile Kesmenin Madencilikte Kullanım Alanları	16
1.7.1. Kömür Madenciliği	16
1.7.2. Doğal Taşların Kesilmesi ve İşlenmesi.....	18
1.7.3. Boyut Küçültme	19
1.7.4. Delik Delme ve Tünel Açma	21
1.8. Literatür Özeti.....	21
1.9. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı	32
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	35
2.1. Deney Malzemesi ve Karakterizasyonu	35
2.2. Deney Tasarımı ve Düzenegi.....	41
2.3. Kesme Sonrası Granit Örneklerin Kesme Geometrilerinin Analizi	43

3.	BULGULAR VE İRDELEME	47
3.1.	Parametrik Değişimlerin Kesme Performansı Üzerindeki Etkisi	47
3.1.1.	Kesme Derinliği	47
3.1.1.1.	Kesme Hızı Değişimi	47
3.1.1.2.	Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi	48
3.1.1.3.	Meme-örnek Mesafesi Değişimi	49
3.1.1.4.	Çalışma Basıncı Değişimi	50
3.1.1.5.	Aşındırıcı Boyutu Değişimi	51
3.1.1.6.	Varyans Analizi.....	52
3.1.2.	Kesme Aşınma Bölgesi Derinliği	54
3.1.2.1.	Kesme Hızı Değişimi	54
3.1.2.2.	Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi	55
3.1.2.3.	Meme-örnek Mesafesi Değişimi	56
3.1.2.4.	Çalışma Basıncı Değişimi	57
3.1.2.5.	Aşındırıcı Boyutu Değişimi	57
3.1.2.6.	Varyans Analizi.....	58
3.1.3.	Kesme Genişliği	60
3.1.3.1.	Kesme Hızı Değişimi	60
3.1.3.2.	Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi	61
3.1.3.3.	Meme-örnek Mesafesi Değişimi	62
3.1.3.4.	Çalışma Basıncı Değişimi	63
3.1.3.5.	Aşındırıcı Boyutu Değişimi	64
3.1.3.6.	Varyans Analizi.....	65
3.1.4.	Kerf Açısı	67
3.1.4.1.	Kesme Hızı Değişimi	67
3.1.4.2.	Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi	68
3.1.4.3.	Meme-örnek Mesafesi Değişimi	69
3.1.4.4.	Çalışma Basıncı Değişimi	70
3.1.4.5.	Aşındırıcı Boyutu Değişimi	71
3.1.4.6.	Varyans Analizi.....	71
3.1.5.	Yüzey Pürüzlülüğü.....	73
3.1.5.1.	Kesme Hızı Değişimi	73
3.1.5.2.	Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi	74

3.1.5.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi	75
3.1.5.4. Çalışma Basıncı Değişimi	76
3.1.5.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi	77
3.1.5.6. Varyans Analizi.....	78
3.2. Kayaç Dokusal Özelliklerin Kesme Performansı Üzerindeki Etkisi	80
3.3. SEM Analizleri	96
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	102
5. KAYNAKLAR.....	105
6. EKLER	114
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

AŞINDIRICI SU JETİ (ASJ) İLE KAYAÇ KESMEDE PARAMETRİK DEĞİŞİMLERİN
VE MALZEME DOKUSAL ÖZELLİKLERİNİN KESME PERFORMANSI
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

İzzet KARAKURT

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Kerim AYDINER
2011, 113 Sayfa, 20 Sayfa Ek

Bu çalışmada; aşındırıcı su jeti ile kayaç kesmede, parametrik değişimlerin ve malzeme dokusal özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar Taguchi deney tasarımı ile gerçekleştirilmiştir. Kesme performans göstergeleri olarak her bir örneğin kesme ve kesme aşınma bölgesi derinliği, kesme genişliği, kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Parametrik değişimlerin ve kayaç dokusal özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkileri, ortalamaların ortalaması (mean of means) ilkesine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca, varyans analizleri (ANOVA) ile proses üzerinde istatistiksel olarak etkili olan kontrol faktörleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, parametrik değişimlerin performans ölçütleri üzerindeki etkilerinin literatürde mevcut araştırmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Varyans analizleri sonucunda; kesme performans göstergeleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlılık derecesi yüksek olan kontrol faktörlerinin; kesme hızı, aşındırıcı boyutu ve meme-örnek mesafesi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kesme performans göstergeleri ile kayacı oluşturan minerallerin bileşim oranları arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Ek olarak, kesme performans ölçütlerinin kayaç tane boyutundan ve tanelerin diziliminden önemli ölçüde etkilendiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcı Su Jeti, Kayaç, Doku, Kesme Performansı, Taguchi Deney Tasarımı, Anova

PhD. Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF EFFECTS OF THE PARAMETRIC CHANGES AND
MATERIAL TEXTURAL PROPERTIES ON THE CUTTING PERFORMANCE IN
ROCK CUTTING BY ABRASIVE WATERJET (AWJ)

İzzet KARAKURT

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Kerim AYDINER
2011, 113 Pages, 20 Pages Appendix

In this study; effects of the parametric changes and the material textural properties on the cutting performance in abrasive waterjet cutting of rock are investigated. Experimental studies are conducted on the basis of Taguchi design approach. The cut and cutting wear zone depth, the kerf width, the kerf angle and the surface roughness of each sample are measured as cutting performance indicators. Effects of the parametric changes and material textural properties on the cutting performance are assessed by mean of means. Additionally, the control factors being statistically significant on the process are determined through the analysis of variance (ANOVA). When the results are examined, it is seen that the effects of the parametric changes on the performance indicators are in accordance with the results of the studies existing in relevant literature. As a result of ANOVA, it is determined that the control factors which have statistically high significance on cutting performance indicators are the traverse speed, the abrasive size and the standoff distance. Furthermore; a consistent relation between the minerals' compositions forming the rock and cutting performance indicators could not be established. Additionally, it is observed that the cutting performance indicators are dramatically affected by the grain size of the rock and spatial arrangement of the grains.

Keywords: Abrasive Waterjet, Rock, Texture, Cutting Performance, Taguchi Approach, Anova

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Su jeti teknolojisinin tarihsel gelişimi (Zeng, 1992)	1
Şekil 1.2. Kesme yöntemlerinin kesilebilen malzeme cinsi ve kalınlığına göre karşılaştırılması (Akkurt, 2004).....	2
Şekil 1.3. Su jeti teknolojisi kesme sistemi elemanları (Geren ve Tunç, 2008)	3
Şekil 1.4. Aşındırıcı su jeti memesinin (nozulunun) şematik gösterimleri (Ergür, 2007)...	5
Şekil 1.5. Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan garnet, (a) öğütülmemiş, (b) öğütülmüş (ortalama tane boyutu 100 µm).....	6
Şekil 1.6. Su jeti ile kesme yönteminde sönümleyici olarak kullanılan malzemelere ait örnekler (URL-1, 2010)	7
Şekil 1.7. Su jeti ile kesmede kesme/aşınma bölgelerinin oluşumu(Hashish, 1995)	9
Şekil 1.8. Yarık kavisliliği oluşum mekanizması (Arola ve Ramulu,1996).....	10
Şekil 1.9. Su jeti ile kesmede kerf profili şematik gösterimi (Liu, 2004)	11
Şekil 1.10. Su jetinin kerf profilini oluşturma mekanizması şematik gösterimi (Srinivasu et al., 2009)	12
Şekil 1.11. Kesme aşınma ve deformasyon aşınma bölgesi temsili görünümü, a) kesme aşınma bölgesi, b)deformasyon aşınma bölgesi	13
Şekil 1.12. a) Su jeti monte edilmiş tamburlu kesici şematik görünümü b) su jeti monteli tamburlu kesicinin çalışma anındaki görünümü (Thimons vd., 1987; Handewith vd., 1985).....	17
Şekil 1.13. Yüzeiden damara açılan kuyularla kömürün üretilmesi (Bairu vd., 2008).	18
Şekil 1.14. Granit ocağında kullanılan su jeti kesme makinesi (Ferris ve Hall., 2004)	19
Şekil 1.15. Yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme yöntemi şematik gösterimi (Longlian vd., 2006).	20
Şekil 1.16. Kayaç kazısında kesici uç ile su jetinin birlikte kullanımı (Dubugnon, 1981) .	29
Şekil 1.17. Türkiye doğal taş ve maden ihracatının yıllara göre dağılımı (İMMİB, 2009). 33	
Şekil 1.18. Türkiye doğal taş ihracatının ürün gruplarına göre dağılımı (İMMİB, 2009)...	34
Şekil 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan örneklere ait görüntüler a) iri taneli kayaçlar, b) orta taneli kayaçlar, c) ince taneli kayaçlar	36
Şekil 2.2. Deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneğinin şematik görünümü (Duflou ve arkadaşları, 2001'den değiştirilerek).....	43
Şekil 2.3. Kesme sonrası elde edilen yüzey görüntüsü, a) kesme aşınma bölgesi derinliği, b) deformasyon aşınma bölgesi derinliği, a+b) kesme derinliği	44
Şekil 2.4. Kerf açısı oluşumu şematik gösterimi (Wang ve Guo, 2003)	45

Şekil 2.5. Kesme işlemi sonrası granit örnekler ve örnek yüzey pürüzlülük ölçümleri....	45
Şekil 2.6. SJ-301 Surfrest iğne uçlu pürüzlülük ölçerin şematik görünümü ve çalışma ilkesi.....	46
Şekil 3.1. Örnek kesme derinliklerinin kesme hızına bağlı değişimi	48
Şekil 3.2. Örnek kesme derinliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi.....	49
Şekil 3.3. Örnek kesme derinliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi	50
Şekil 3.4. Örnek kesme derinliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi.....	51
Şekil 3.5. Örnek kesme derinliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi	52
Şekil 3.6. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin kesme hızına bağlı değişimi	55
Şekil 3.7. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi	56
Şekil 3.8. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi	56
Şekil 3.9. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi	57
Şekil 3.10. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi	58
Şekil 3.11. Örnek kesme genişliklerinin kesme hızına bağlı değişimi.....	61
Şekil 3.12. Örnek kesme genişliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi.....	62
Şekil 3.13. Örnek kesme genişliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi.....	63
Şekil 3.14. Örnek kesme genişliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi.....	64
Şekil 3.15. Örnek kesme genişliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi	64
Şekil 3.16. Örnek kerf açılarının kesme hızına bağlı değişimi.....	67
Şekil 3.17. Örnek kerf açılarının aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi	68
Şekil 3.18. Örnek kerf açılarının meme-örnek mesafesine bağlı değişimi.....	69
Şekil 3.19. Örnek kerf açılarının çalışma basıncına bağlı değişimi	70
Şekil 3.20. Örnek kerf açılarının aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi.....	71
Şekil 3.21. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin kesme hızına bağlı değişimi.....	74
Şekil 3.22. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi....	75
Şekil 3.23. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi	76
Şekil 3.24. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi.....	77
Şekil 3.25. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi.....	78
Şekil 3.26. Taneli kayalarda kırılma/kesilme oluşumu (Omar vd, 2010).....	82
Şekil 3.27. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	82
Şekil 3.28. Çalışılan kayaçlara ait ince kesit görüntüleri a) iri taneli kayaç, b) orta taneli kayaç, c) ince taneli kayaç	83

Şekil 3.29. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)	84
Şekil 3.30. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	85
Şekil 3.31. Ortalama kayaç tane boyutu-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	85
Şekil 3.32. Ortalama kayaç tane boyutu-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	86
Şekil 3.33. Pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profilleri a) iri taneli kayaçlardan alınan pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profili, b) ince taneli kayaçlarda alınan pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profili	87
Şekil 3.34. Kayaç mikrosertliği-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	89
Şekil 3.35. Kayaç mikrosertliği-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	90
Şekil 3.36. Kayaç mikrosertliği-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	91
Şekil 3.37. Kayaç mikrosertliği-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	91
Şekil 3.38. Kayaç mikrosertliği-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)	92
Şekil 3.39. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	93
Şekil 3.40. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)	93
Şekil 3.41. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	94
Şekil 3.42. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	95
Şekil 3.43. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç).....	95
Şekil 3.44. Rosa Minho kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (derin/keskin kesilme izleri, kopan parçacıklar)	97
Şekil 3.45. Carmen Red kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (sabanlama (ploughing), parçacık kırıntı oluşumu).....	98
Şekil 3.46. Baltic Brown kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (derin/keskin kesilme izleri). 98	
Şekil 3.47. Giresun Vizon kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (Sabanlama (Ploughing), akma)	99
Şekil 3.48. Aksaray Yaylak kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (Kopan ve yüzeyde sıkışan parçacıkları)	99

Şekil 3.49. Azul Platino kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (aşındırıcı tanecikleri, taneler arası sınırın görünümü)	100
Şekil 3.50. Bergama Grey kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (malzemedan kopan parçacıklar, Sabanlama (ploughing) oluşumu).....	100
Şekil 3.51. Multicolor Red kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (malzemedan kopan ve yüzeyde sıkışan parçacıklar, aşındırıcı taneciklerinin görünümü)	101
Şekil 3.52. Balaban Green kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (tane içi veya tane sınırında oluşan muhtemel çatlama/kırılma, süpürerek kesme (smear) oluşumu, keskin/derin kesilme izleri).....	101

TABLULAR DİZİNİ

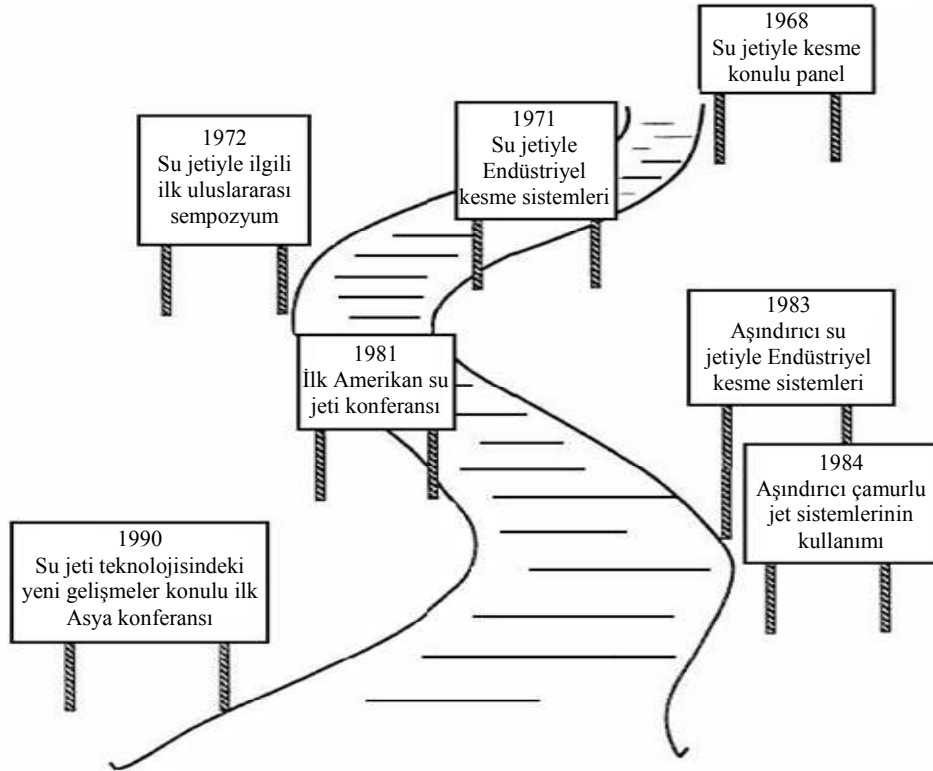
Sayfa No

Tablo 1.1. Su jeti ile kesme yönteminin uygulama alanları (Külekçi, 2002; Akkurt, 2004)	6
Tablo 1.2. Su jeti kesme sistemi parametreleri.....	8
Tablo 2.1. Seçilen örneklerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	37
Tablo 2.2. Granit örneklerin görüntü analiz yazılımı ile elde edilen tane boyut dağılımları	38
Tablo 2.3. Deneyselerde kullanılan örneklerin mineralojik analiz sonuçları	39
Tablo 2.4. Deney faktörleri ve seviyeleri	41
Tablo 2.5. $L_{16}[4^4*2^1]$ ortogonal dizinine göre tasarlanmış deneyin faktör ve seviyeleri	42
Tablo 2.6. Deneysel çalışmalarda kullanılan su jeti makinesine ait özellikler.....	43
Tablo 3.1. Kayaçlarda elde edilen ortalama kesme performans değerleri.....	81

1. GENEL BİLGİLER

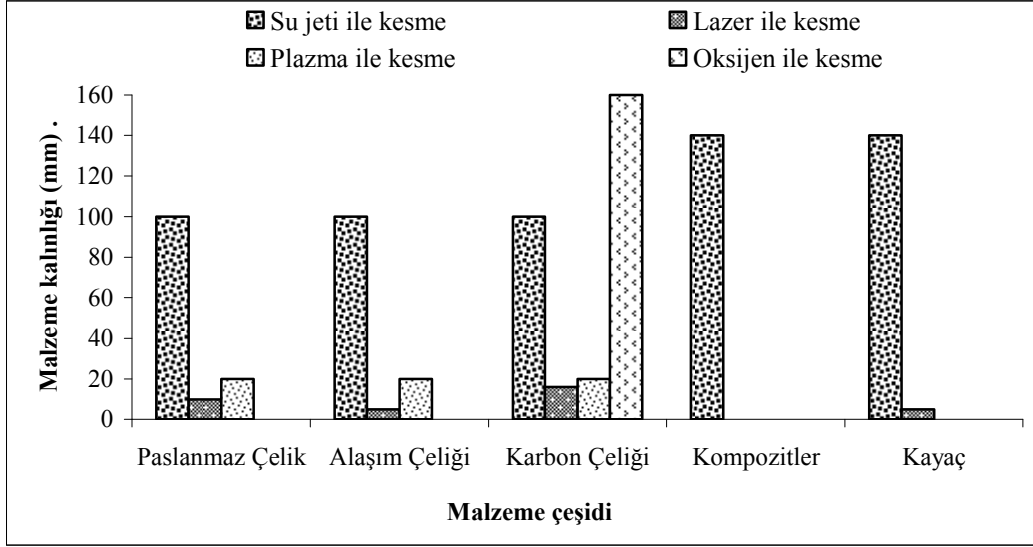
1.1.Giriş

Darbe ya da basınç etkisinden faydalanılarak suyun malzemelerin kesilmesi ve işlenmesinde kullanımı 1930'lu yıllara kadar dayanır. Ancak yöntem 1980'lerden sonra daha çok ilgi çekmiş ve endüstride çok farklı alanlarda yaygın kullanım olanağı bulmuştur. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi su jeti ile kesmenin karton kâğıt kesiminde kullanıldığı yıllarda, araştırmacılar ve sanayi kuruluşlarının büyük gayretleriyle, bugünkü anlamdaki kesme ve/veya işleme şekli kullanılarak, farklı endüstriyel dallarda aranılan su jeti ile kesme ve/veya işleme metoduna ulaşılmıştır. Aşındırıcı malzeme eklenerek uygulanan aşındırıcı su jeti yöntemi, düşük basınçlarda çalışma olanağı sunduğundan özellikle sert ve dayanıklı malzemelerin kesilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşındırıcı su jeti kesme sistemleri, madencilik endüstrisinde kayaç ve benzeri malzemelerin kesilmesi, gevşetme ve kayaç delmede kullanım alanı bulurken daha çok doğal taş üretim işlemlerinde ocakta blok üretimi ya da fabrikada son ürün üretimi süreçlerinde yaygınlıkla kullanılmaktadır (Momber ve Kovaçeviç, 1997).



Şekil 1.1. Su jeti teknolojisinin tarihsel gelişimi (Zeng, 1992)

Geleneksel kesme sistemleri ile kıyaslandıklarında, su jeti ile kesme düşük çalışma basıncı gereksinimi, esnek ve çok yönlü kesme yetenekleri gibi önemli avantajlara sahiptir (Kulaksız, 2005., Engin, 2006a). Çeşitli kesme yöntemlerinin kesilebilen malzeme cinsi ve kalınlığına göre karşılaştırılması Şekil 1.2’de verilmiştir.



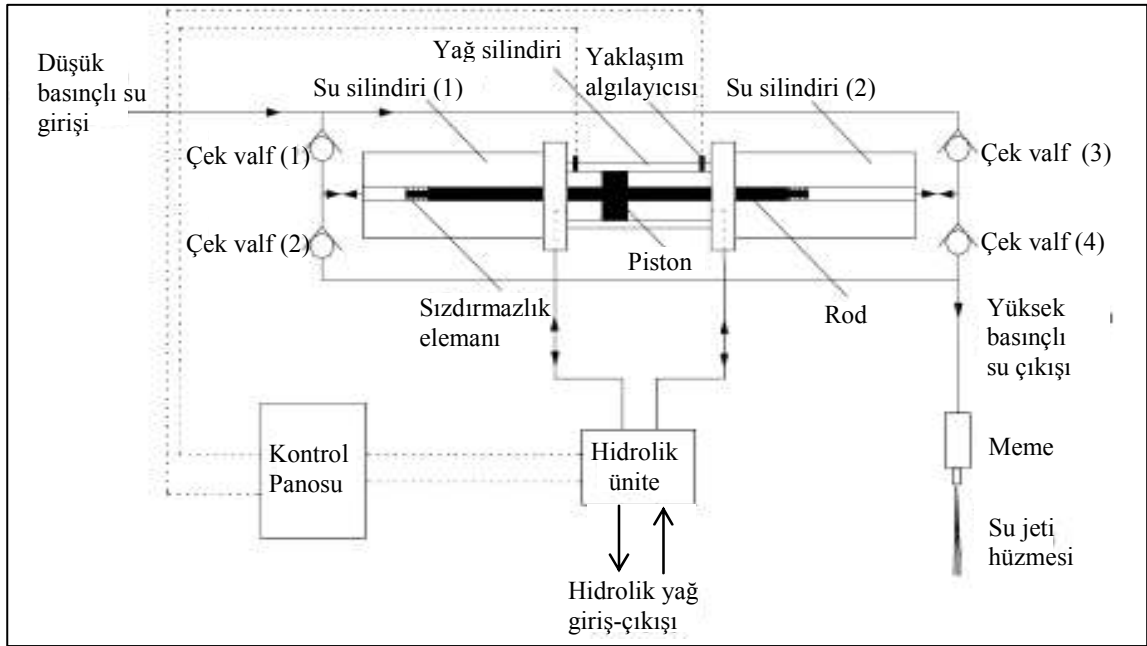
Şekil 1.2. Kesme yöntemlerinin kesilebilen malzeme cinsi ve kalınlığına göre karşılaştırılması (Akkurt, 2004)

1.2. Su Jeti ile Kesme Sisteminin Temel Bileşenleri

Tipik bir su jetiyle kesme sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.3’de verilmiştir. Genel olarak bir su jeti kesme sisteminin temel bileşenlerini başlıca dört başlık altında toplamak mümkündür: 1) Yüksek basınçlı pompa sistemi, 2) basınca dayanıklı taşıyıcı borular, 3) aşındırıcı ünitesi, 4) kesme kafası ve çalışma tezgâhı. Bu dört ana sistemin fonksiyonları ve çalışma prensipler ise aşağıda açıklanmıştır.

- 1) Yüksek basınçlı pompa sistemi: Bu sistem su jeti ile kesmenin adeta kalbini oluşturan bileşendir. Kesme işlemi için gerekli su basıncı bu sistem tarafından sağlanır ve sisteme giren şebeke suyunun basıncı 400 MPa’a kadar artırılabilir.
- 2) Basınca dayanıklı taşıyıcı borular: Yüksek basınçlı pompa sisteminde ihtiyaca göre basıncı artırılan suyun kesme kafasına taşınmasını sağlayan çapları nispeten dar olan ve basınca dayanıklı borulardır. Ayrıca, bu boruların kesme kafasının hareketine rahatlıkla uyum sağlayabilmeleri için yeterince esnek olmaları gerekir.

- 3) Aşındırıcı ünitesi: Aşındırıcı katkılı su jeti kesme yönteminde kesme işlemi için gerekli olan aşındırıcı partiküllerini sağlayan sistemdir. Karşım odası, aşındırıcı ölçer metre ve aşındırıcı besleme borusundan oluşur. Aşındırıcı ünitesi yerinin, verimli ve doğru bir aşındırıcı beslemesi yapılabilmesi için kesme kafasına mümkün olduğu kadar yakın olması istenir.
- 4) Kesme kafası ve çalışma tezgâhı: Kesme işlevini yerine getiren meme (nozzle)'yi bünyesinde bulunduran sistemdir. Basınca dayanıklı borularla kesme kafasına yönlendirilen suyu, kesme kafasında bulunan memeden geçirilerek hızını artırması ve kesme işlevini yapması sağlanır. Meme'den çıkan yüksek basınç ve hızdaki jetin, hem kesilen malzemeye hem de çevreye zarar vermemesi için sistemde bir de çalışma tezgâhı bulunur. Bu çalışma tezgâhı, hem kesilen malzemenin memeye belli bir mesafede kalmasını sağlar hem de jetin çevre ve insana zarar vermesini engeller. Ayrıca, geri dönüşümün mümkün olduğu durumlarda, çalışma tezgâhında biriken aşındırıcı partiküllerin geri kazanılmasına imkân tanır.



Şekil 1.3. Su jeti teknolojisi kesme sistemi elemanları (Geren ve Tunç, 2008)

Su jeti ile kesme sisteminde yukarıda bahsedilen dört ana bileşenden başka bir de sistemin otomatik kontrolünü sağlayan bir ünite mevcuttur. Bütün uygulamalarda, yapılacak işler bilgisayar ortamında planlanır ve kesme kafasına yönlendirilerek kesme işlevinin yapılması sağlanır. Böylelikle otomatik kumanda sağlanarak, güvenli ve hassas

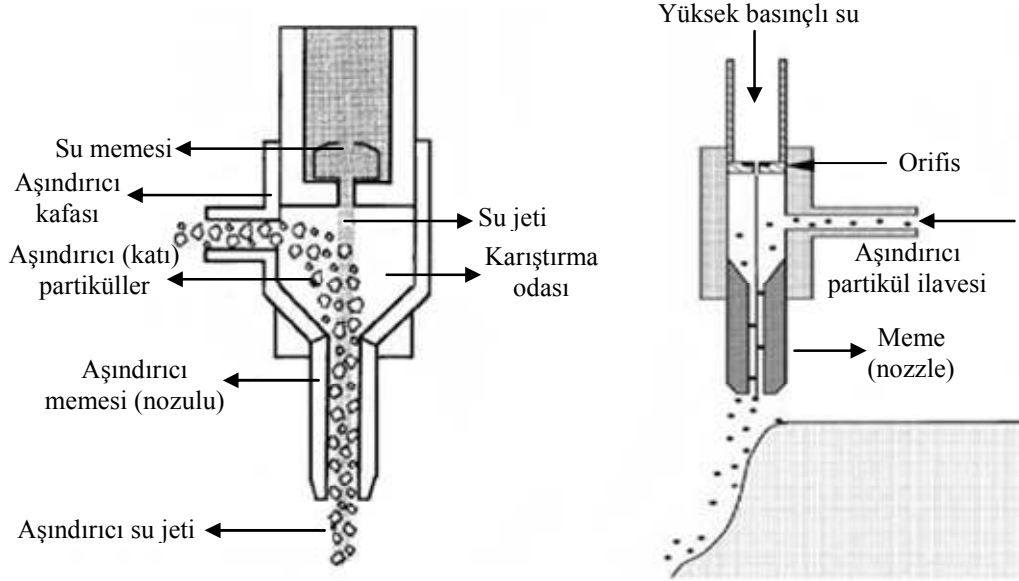
kesme işlemini yapılıır. Öte yandan su jeti ile malzemelerin kesilmesi kısaca şu şekilde özetlenebilir. Basıncı arttırılan suyun dar bir ağızdan (nozzle) geçirilerek malzeme yüzeyine püskürtülmesi sağlanır. Malzemeye temas eden jet, malzemedeki erozyonla parçacık kopararak kesme işlemini gerçekleştirir. Yöntemde aşındırıcı partiküllerin kullanılması, kayaç gibi sert ve dayanıklı malzemelerin kesilmesini/işlenilmesini kolaylaştırır (Ergür, 2007). Sistemdeki su pompası elektrik motorundan güç almakta, hidrolik sistemde dolaşan yağ basıncını belirli bir değere çıkarmaktadır. Sistemde yoğunlaştırıcı (intensifier) adı verilen çift taraflı çift etkili bir hidrolik piston mevcuttur. İleri geri hareket eden çift etkili hidrolik silindirden belirli bir değerdeki basınçlı suyu alarak maksimum basınca çıkarabilmektedir. Daha sonra yüksek basınçlı su, basınç düzenleyicisine gönderilir. Burada basınç düzenleyicisinin görevi, akışın basıncını yüksek tutmak ve basınçtaki değişmeyi önlemektir. Bir başka deyişle ileri geri hareket eden pistonun yön değiştirmesi sırasında çıkış basıncının sabit değerde kalmasını ve suyun hızının düzgün olmasını basınç düzenleyicisi sağlar (Külekçi, 2002).

Su jeti ile kesme ve işleme yöntemi, çok çeşitli atölye içi ve dış ortamlarda uygulamalar için tercih edilebilir, emniyetli ve ekonomik bir yöntemdir. Yöntemin kullanılmasını yaygınlaştıran önemli bir avantaj malzeme kaybının az olmasıdır. Değişen malzeme özelliklerinde kullanılabilen iki farklı su jeti tasarımı mevcuttur. 1) Saf su jetleri ve 2) Aşındırıcı katkılı su jetleri. Her iki tasarım da kendine özgü özellikleri olmasına rağmen çalışma prensipleri aynıdır. Aralarındaki en önemli fark, kesme etkisini arttırmak amacıyla aşındırıcı partiküllerin su jetine ilave edilmesidir (Akkurt vd., 2004).

1) Saf Su Jetleri: Saf su jetleri, genellikle sabit basınç altında işlenebilen yumuşak malzemeler ile suyun ilettiği basıncın etkisiyle yapısında mikro düzeyde kırıklar meydana gelen gevrek malzemelerin kesilmesi ve işlenmesinde kullanılmaktadır. Kesilen malzemeye suyun temasının olumsuz etkilerinin olduğu durumlarda, jetin püskürtme memesinden çıktıktan sonraki sapmalarının önüne geçmek ve suyun içerisinden geçtiği ekipmanların aşınmalarını geciktirmek için su içerisine polimer esaslı bazı ilaveler yapılarak kimyasal katkılı su jetleri oluşturulmaktadır. İlk olarak karton mukavvaların kesilmesinde kullanılan bu teknoloji, günümüzde çeşitli endüstri dallarında kullanım alanı bulmaktadır. Bu kullanım alanlarına yönelik bir değerlendirme Tablo 1.1'de sunulmuştur (Külekçi, 2002; Mendi ve Külekçi, 1999).

2) Aşındırıcı Katkılı Su Jetleri: Çalışma prensibi saf su jetleri ile benzer olan aşındırıcı katkılı su jetleri, daha çok kesilmesi ve/veya işlenmesi zor sert ve dayanıklı

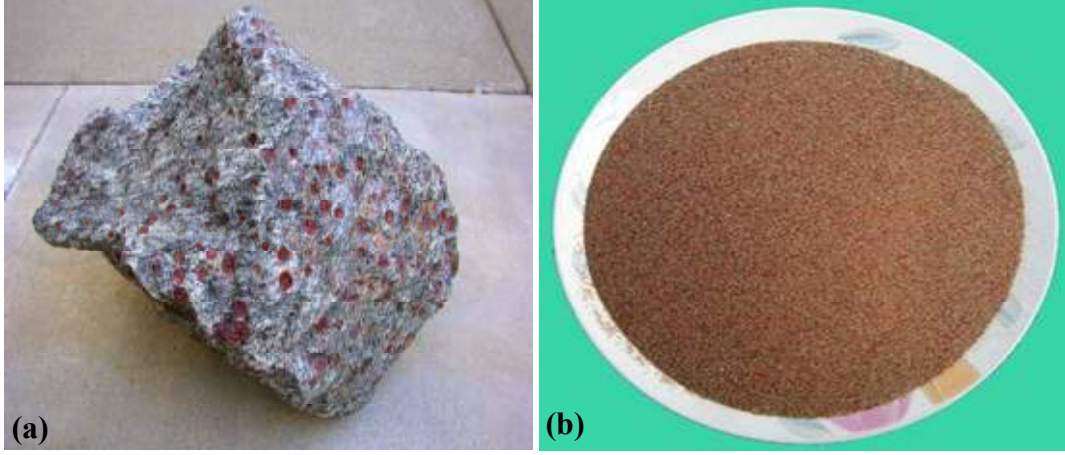
malzemelerin kesilmesi ve/veya işlenilmesinde kullanılmaktadır (Tablo 1.1). Yöntemde kullanılan aşındırıcı partiküller, kesme gücünün artırılması işlevini görür. Aşındırıcı ilaveli bir su jeti kesme kafası görüntüsü Şekil 1.4’de verilmiştir. Kesme gücünün artmasını sağlayan aşındırıcı tanecikleri aynı zamanda sistemin düşük basınçlarda çalışmasına da imkân verir (Mendi ve Külekçi, 1999).



Şekil 1.4. Aşındırıcı su jeti memesinin (nozulunun) şematik gösterimleri (Ergür, 2007).

Aşındırıcı su jeti ile kesme yönteminde, beyaz ve kahverengi alüminyum oksit, cam parçacıkları, yüksek karbonlu çelik bilyeler ve garnet gibi malzemeler aşındırıcı olarak kullanılabilir. Aşındırıcı malzeme ile ilgili değerlendirmelerde kesilecek malzeme yapısı, aşındırıcı malzeme yapısı, malzemenin sertliği, mekaniksel davranış, tane şekli, tane büyüklüğü, tane ortalama dağılımı dikkate alınır (Momber vd., 2002). Aşındırıcı olarak kullanılmak üzere çok sayıda malzeme olmasına rağmen birçok uygulamada “Garnet” kullanılmaktadır (Fowler vd., 2009). Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan garnete ait bir görüntü Şekil 1.5’de verilmiştir.

Aşındırıcı katkılı jetin malzemeyi kestikten sonra tezgâha doğrudan etki etmeden önce belli bir sistemle yakalanıp enerjisinin soğurulması gerekir. Böylelikle, su jetinin makine parçalarına zarar vermesinin önlenmesinin yanında gürültü, toz vb. zararlı çevresel etkilerini de azaltılması sağlanır.

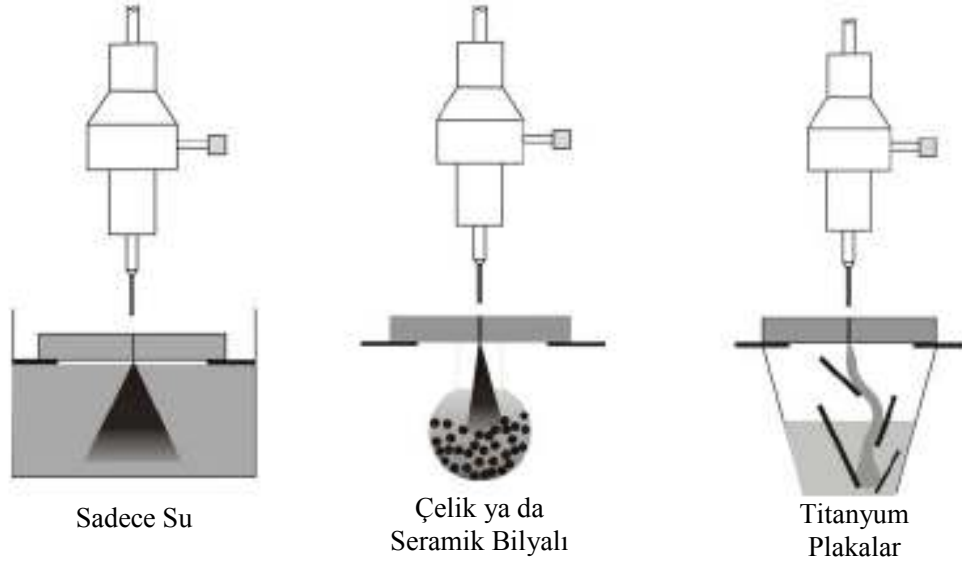


Şekil 1.5. Aşındırıcı malzeme olarak kullanılan garnet, (a) öğütülmemiş, (b) öğütülmüş (ortalama tane boyutu 100 µm)

Tablo 1.1. Su jeti ile kesme yönteminin uygulama alanları (Külekçi, 2002; Akkurt, 2004)

Su Jeti	Kullanım Alanı	Örnekler
Saf Su Jeti (SSJ)	Plastiklerin kesilmesi	Kalıp endüstrisindeki mühendislik plastikleri, yerli kullanım için parça endüstrisi, film endüstrisi, kablo vb kesimi
	Kâğıt ve kâğıt hamurunun kesilmesi	Oluklu kâğıt, çocuk bezi ve diğer sağlıkla ilgili kâğıt kesimi, artık kâğıt geri dönüşümü
	Fiber ve kumaş kesilmesi	Fiber ve spor malzemeleri endüstrisi, giyim endüstrisi
	Kauçuk ve deri kesilmesi	Kauçuk, deri ve suni deri endüstrisi, ayakkabı endüstrisi
	Gıda ve donmuş yiyeceklerin kesilmesi	Gıda, donmuş yiyecekler endüstrisi
	Kereste ve kontrplak kesilmesi	Ormancılık, kereste endüstrisi, ev yapım endüstrisi, iç dekoratif uygulamalar
	Diğer	Patlayıcı endüstrisi, asbest malzemelerin kesilmesi, katı yakacakların kesilmesi buz kırıcı
Aşındırıcı Su Jeti (ASJ)	Metalik yaprak kesme, titanyum, alüminyum, paslanmaz çelik, süper alaşımlar vb.	Havacılık endüstrisi, otomobil endüstrisi, gemi inşa endüstrisi, köprü imalatı, demir endüstrisi, metalik ürünlerin üretimi vb.
	Tel, puslu, laminatlı cam kesilmesi	Cam endüstrisi, iç dekorasyon, ev yapım endüstrisi, tıbbi cihazların üretimi
	Gelişmiş malzemelerin kesilmesi, kompozit malzemeler, seramikler, mıknatıslı malzemeler	Seramik ve kaliteli seramik endüstrisi, Elektronik parçaları endüstrisi, optik fiber endüstrisi
	Beton, takviye beton, çimento harcının kesilmesi	İnşaat endüstrisi, de montaj, ev yapım endüstrisi.
	Kayaç, doğal taş, kömür kesilmesi	Madencilik endüstrisi, Taş ocakçılığı, kömür madenciliği (Hidrolik Kazı), seramik endüstrisi, bahçecilik
	Hurda parça	Hurda parça kesim ve taşıma
	Diğer	Çapak alma ve temizleme, boya kaplama kazıma ve deliklerin temizlenmesi vb.

Su jetinin meme çıkışıdan sonraki gücünün büyük bir kısmı kesilecek malzemeyi terk ettikten sonra da jet içerisinde kalır (Engin, 2006b). Önlem alınmadığı takdirde malzeme altındaki tezgahın delinip zarar görmesi söz konusudur. Ayrıca su jetinin malzeme dışına çıktığı durumlarda sahip olduğu tüm gücü tezgâha iletilecektir. Çalışılan malzemenin geometrisi, makine yapısı, çevresel gereksinimler ve su jetinin türüne göre kullanılan sistemin yapısı değişmektedir. Bu amaçlar için kullanılan sistemlere ait örnek bir görüntü Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. Su jeti ile kesme yönteminde sönümleyici olarak kullanılan malzemelere ait örnekler (URL-1, 2010)

1.3. Su Jeti Kesme Sistemi Parametreleri

Su jeti ile kesme sistemlerinin kesme performansını etkileyen çok sayıda parametresi vardır. Bunları bağımlı ve bağımsız parametreler olarak iki ana grupta toplamak mümkündür (Kovacevic, 1991).

1.2.1. Bağımsız Parametreler

Bağımlı parametreler, özellikleri herhangi bir değişkene bağlı olmayan parametrelerdir. Bağımsız parametreler, hidrolik, kesme, aşındırıcı ve kesilen malzeme

özellikleri olarak sınıflandırılabilir. Bu parametrelere yönelik bir değerlendirme Tablo 1.2’de sunulmuştur.

1.2.2. Bağımlı Parametreler

Bağımlı parametreler, bağımsız parametrelerin değişiminden etkilenen parametrelerdir. Çıkış parametreleri olarak da bilinen bu parametreler, kerf geometrisi, kesme derinliği, kerf topografyası ve parçacık uzaklaştırma oranı olarak sınıflandırılabilir (Tablo 1.2)

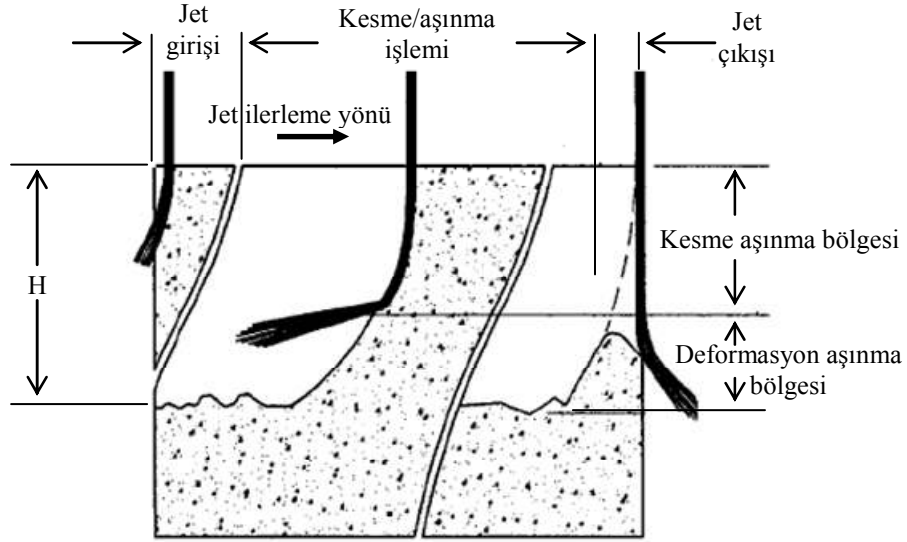
Tablo 1.2. Su jeti kesme sistemi parametreleri

BAĞIMSIZ PARAMETRELER	Hidrolik	<ul style="list-style-type: none"> • Jet basıncı • Jet çapı
	Kesme	<ul style="list-style-type: none"> • Kesme hızı • Meme-örnek mesafesi • Jet etki açısı
	Aşındırıcı	<ul style="list-style-type: none"> • Aşındırıcı tipi • Aşındırıcı besleme oranı • Aşındırıcı boyutu
	Malzeme özellikleri	<ul style="list-style-type: none"> • Dayanım • Sertlik, • Kırılganlık
BAĞIMLI PARAMETRELER	Kerf geometrisi	<ul style="list-style-type: none"> • Kerf genişliği • Kerf açısı • Geometrik ve boyutsal olarak doğruluk
	Kesme derinliği	<ul style="list-style-type: none"> • Kerf derinliği
	Kerf topografyası	<ul style="list-style-type: none"> • Yüzey pürüzlülüğü • Dalgalılık/Çiziklik
	Parçacık uzaklaştırma oranı	<ul style="list-style-type: none"> • Kesmeyle uzaklaşan malzeme miktarı

1.4. Su Jeti ile Kesmenin Temel Esasları

Su jeti ile kesme işleminde yüksek hız ve basınçtaki su malzeme yüzeyine püskürtülür ve malzemeden erozyonla parçacık kopararak kesme işlemi gerçekleşir. Bir başka ifadeyle su jeti ile kesme işleminde kesme işleminin esasını aşınma oluşturur. Su jeti ile kesmede araştırmacılar tarafından yaygın kabul gören aşınma mekanizması, Hashish

(1984a; 1984b ve 1988) tarafından yürütülen çalışmalarda ifade edilen iki aşamalı kesme ve/veya aşınma mekanizmasıdır. Birincisi, kesme aşınma bölgesi olup mikro işlemede olduğu gibi aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik (temas) açıda çarpmasıyla malzemeden parçacık koparılır ve kesme işlemi gerçekleştirilir. Bu bölge kesme aşınma bölgesi olarak adlandırılır. Bir başka ifadeyle, kesme aşınma bölgesi kesilen malzemenin kesme yüzeyine bakıldığında düzgün olan üst kısımdır. İkinci kesme/aşınma mekanizması ise aşındırıcı partiküllerin büyük açılarda malzeme yüzeyine temas etmesi sonucu aşırı plastik deformasyon ile malzemeden parçacık koparılmasıdır. Bu bölgede deformasyon aşınma bölgesi olarak adlandırılır (Şekil 1.7) (Yazıcıoğlu, vd., 1993; Hashish, 1995).

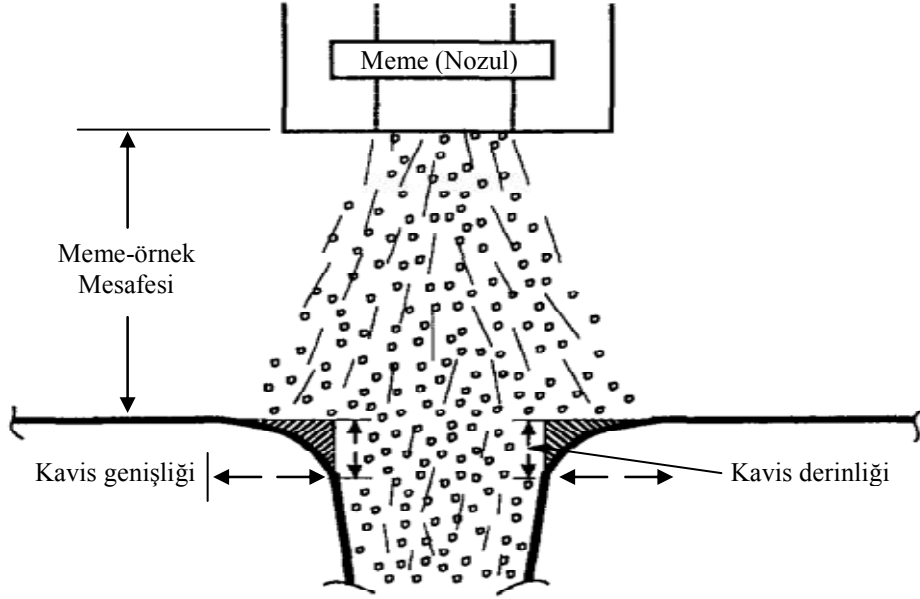


Şekil 1.7. Su jeti ile kesmede kesme/aşınma bölgelerinin oluşumu (Hashish, 1995)

Deformasyon aşınma bölgesi kesilen malzemenin yüzeyinde daha çok çizgili ya da pürüzlü görünen alt kısımdır. Yüksek hızlı su jeti hızına bağlı olan malzeme kesme yüzeylerindeki dalgalı ya da çizikli yapı, aşındırıcı parçacıklarının malzeme kesme derinliği boyunca ilerlerken sahip oldukları enerjiyi malzeme yüzeyine çarparak kaybetmesi sonucu ortaya çıkar. Memeden çıkan aşındırıcı partiküllerinin malzemeye ilk temas ettiği yerde ve belirli bir derinliğe kadar yüksek olan hızları, derinliğin artmasıyla malzemeden kopan parçalarında etkisiyle düşer ve özellikle kesme alt yüzeylerinde yüzeye çok sayıda parçacık teması olacağından dalgalı, çizgili yapının oluşmasına yol açar. Aynı zamanda, kesme yüzeylerinin kalitesinin de göstergesi olan bu

bölgeler; suyun basıncı, aşındırıcı miktarı ve akışı, ilerleme hızı, malzeme kalınlığı ve meme titreşiminin bir fonksiyonu olarak değişim gösterir (Lemma vd., 2005).

İki bölgeden oluşan yüzey modeli yaygın bir kabul görmüş olmasına karşın bazı araştırmacılar (Gudimetla vd, 2002; Arola ve Ramulu, 1996; Ramulu vd., 2000) kesme aşınma bölgesinde yarık ağzının hemen girişinde üçüncü bir bölge daha tanımlamışlardır. Başlangıç Deformasyon Bölgesi olarak adlandırılan bu bölge kesme mekanizması ve yüzey özellikleri bakımından kesme aşınma bölgesi ile benzerliklere sahiptir ve özgün yüzey özelliği yarığın giriş kısmında kesme yüzeylerinde oluşan köşe kavisliliğidir. Kesme sürecinde memeyi terk eden aşındırıcı-su karışımı yüzeye doğru genişleyerek yayılır. Buna bağlı olarak aşındırıcı partikülleri de kesme hattının etrafında saçılarak kesme hattının yakın civarlarına çarpar. Bu etki sonucunda Şekil 1.8’de gösterildiği gibi yarık ağzında kesme yüzeylerinin köşelerinde kavisler oluşur. Köşe kavisliliği, kesme sonrası izleyen yüzey işleme süreçlerinde kesme yüzeylerinde fazladan bir derinliğin düzeltilmesini gerektirmesi gibi önemli bir dezavantajı vardır.



Şekil 1.8. Yarık kavisliliği oluşum mekanizması (Arola ve Ramulu,1996)

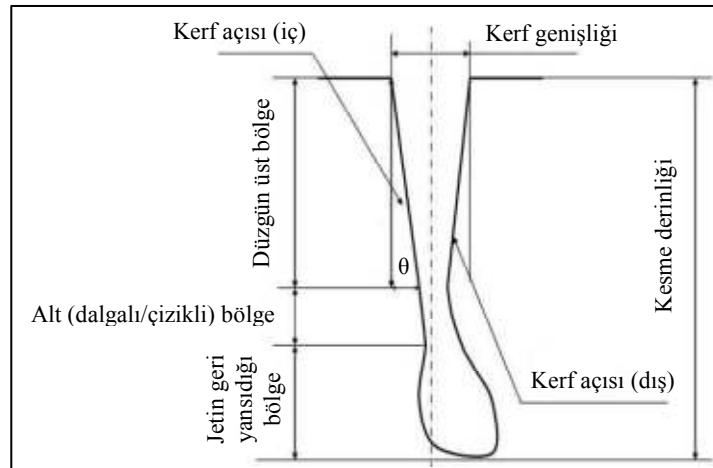
1.5. Su Jeti ile Kesmede Kerf (Yarık) Karakteristikleri

1.5.1. Kerf Profili

Su jeti ile kesmenin başlıca karakteristiklerinden olan kerf (yarık), oluşum mekanizması açısından önemli özelliklere sahiptir. Kerf ya da yarık; kerf genişliği, kerf açısı ve kerf derinliğini ifade eden su jeti ile kesme yöntemine ait geometrik bir özelliktir. Malzeme yüzey kalitesini ifade eden yüzey pürüzlülüğü ya da kesme yüzeyinde oluşan çiziklik/dalgalılık da önemli kerf karakteristiklerindedir. Su jeti ile kesmenin sahip olduğu bu kerf karakteristikleri, genellikle kesme performans ölçütleri olarak değerlendirilmektedir. Genel olarak su jeti ile kesme sonucu ortaya çıkan kerf profili Şekil 1.9'da verilmiştir. Kerf profilinde önemli bir kesme performans ölçütü olan kerf açısı (θ , Şekil 1.9), malzemenin kesme aralığında meydana gelen eğimin ölçüsü olarak ifade edilir ve aşağıda verilen (1) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{h} \right) \quad (1.1)$$

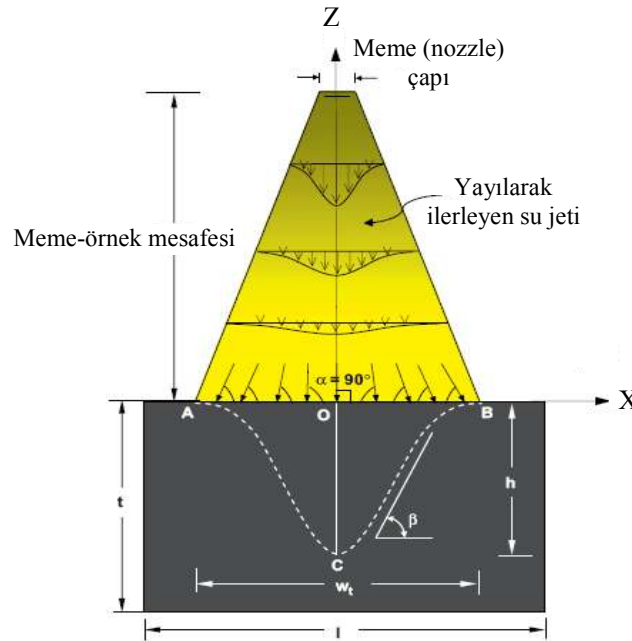
burada; $W_{üst}$, üst kerf (yarık) genişliği, W_{alt} , alt kerf genişliği, h , toplam kesme derinliği ve θ , kerf açısı olarak ifade edilir.



Şekil 1.9. Su jeti ile kesmede kerf profili şematik gösterimi (Liu, 2004)

Kerf profilinin oluşum mekanizması, Hashish ve Plessis (1979) tarafından önerilen model ile açıklanmaktadır. Araştırmacılara göre, kerf profili memeden çıkan jetin etkin çapı ve kesme gücü ile ilişkilidir. Şekil 1.10'da, memeden 90° 'lik açıyla çıkan jetin kerf profilini oluşturma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Hashish ve Plessis (1979) memeden çıkan jetin iç kısımlarındaki hızın ve basıncın dış kısımlarına göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle sert ve dayanıklı malzemelerin kesilmesinde jetin içi kısımlarının etkin rol oynadığını, buna karşın yumuşak ve kesilmesi kolay olan malzemelerde ise memeden çıkan jet çapının büyük bir kısmının etkin rol oynadığını ifade etmişlerdir. Kerf profilinin düşük kesme hızlarında daha belirgin olacağını da ifade eden araştırmacılar, malzeme kalınlığına bağlı olarak kerf profilinde ıraksaklıkların meydana geleceğini belirtmişlerdir.

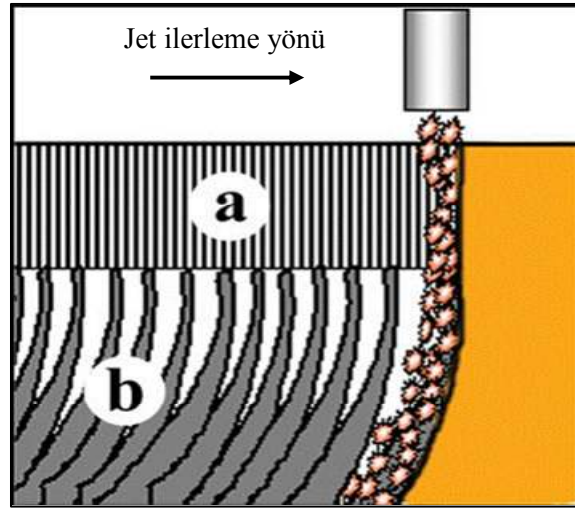
Kerf profilinin önemli göstergelerinden olan kerf genişliği, üst ve alt kerf genişliği olmak üzere iki bileşenden oluşur. Üst kerf bölgesinde köşelerde yuvarlaklıklar oluşması kesme sonrası ikincil işlem gerektireceğinden istenmeyen bir parametredir. Köşelerde oluşan yuvarlaklık ya da kavislik jetin malzemeye temas süresi ile doğrudan ilişkilidir (Liu, 2004). Plastik deformasyondan dolayı üst kısımlarda normalde düşük yuvarlaklık ya da kavislik oluşur. Bu kırılğan malzemelerde daha belirgin şekilde görülebilir. Sünnek malzemelerde ise daha fazladır.



Şekil 1.10. Su jetinin kerf profilini oluşturma mekanizması şematik gösterimi (Srinivasu et al., 2009)

1.5.2. Yüzey Karakteristikleri

Su jeti ile kesmede memeden çıkan jet, malzeme kalınlığı boyunca kesim yaparken sürekli sahip olduğu kinetik enerjiyi kaybeder ve malzeme yüzeyi alt kısımlarına yaklaştıkça etkin kesme gücünü kaybeder. Bu nedenle, jetin malzemeye ilk temas ettiği bölge nispeten daha düzgün, yüzeyin alt kısımları daha dalgalı/çiziklidir. Daha öncede bahsedildiği gibi düzenli olan ilk bölge kesme aşınma bölgesi, dalgalı/çizikli olan bölge ise deformasyon aşınma bölgesidir (Şekil 1.11). Bu iki bölge su jeti ile kesmede kesme yüzey kalitelerinin belirlenmesinde etken rol oynarlar. Aşındırıcı su jeti ile kesmede yüzey kalitesi veya yüzey pürüzlülüğü, genel olarak aşındırıcı partikülleri ile kesilen malzeme arasında meydana gelen mikro düzeydeki etkileşim ile alakalıdır. Aşındırıcı partikülü-malzeme arasındaki bu mikro etkileşim sonucunda, yüzeyde meydana gelen düşük ölçekli düzensizlikler yüzey kalitesi açısından arzu edilen bir durumdur. Arzu edilen bu durum, kullanılan aşındırıcının boyutu ve çeşidi, kesilen malzeme cinsi ve proses parametrelerinin kontrolü altındadır.



Şekil 1.11. Kesme aşınma ve deformasyon aşınma bölgesi temsili görünümü, a) kesme aşınma bölgesi, b)deformasyon aşınma bölgesi

Kesilen malzemenin kesme yüzeyi alt kısımlarında oluşan dalgalılık/çiziklik (Şekil 1.11b) ise kesme yüzeyinde aşındırıcı partikülü-malzeme etkileşiminin yetersiz ya da gereğinden fazla olması, proses parametreleri gibi sebeplerle oluşmaktadır. Bu özellik, aynı zamanda akışa dayalı diğer kesme sistemleri ile elde edilen yüzey özellikleri ile de

benzerlik göstermektedir (Vikram ve Babu, 2002). Ayrıca, kesme yüzeyindeki dalgalılık/çiziklik jetin sahip olduğu enerjinin malzemeyi kesmek için gerekli olan enerjiden daha küçük olmasından kaynaklanan bir durumdur. Çünkü aşındırıcı katkılı jet kesme anında malzeme kalınlığı boyunca ilerlerken sahip olduğu enerjiyi kaybederek kesme işlemini gerçekleştirir. Bu da jetin etkin gücünü malzemenin alt kısımlarına doğru düşmesine sebep olur. Ek olarak, Chao vd. (1995) kesme yüzeylerinde oluşan çizikliğin jet içerisindeki ve kesme sistemindeki türbülansın kaynaklanabileceği ifade etmiştir. Chao ve arkadaşlarının ifade ettiği bu durum, Guo vd. (1993)'nin ifade ettikleri ile örtüşmektedir. Zira Guo ve arkadaşları, kesme yüzeyinde oluşan çizikliğin muhtemel sebeplerini iki kategoriye ayırmışlardır. Birincisi, jet içerisindeki aşındırıcı partiküllerin sahip oldukları kinetik enerjilerinden dolayı dalgalı bir dağılım göstermesi (ki bu jet içerisindeki türbülansa işaret etmektedir), ikincisi ise sistem ya da proses parametreleri arasındaki etkileşim ve/veya kesilen malzemede kesme anında meydana gelen titreşimlerdir.

1.6. Su Jeti ile Kesmenin Diğer Sistemlerle Karşılaştırılması

Su jeti kesme sistemleri geleneksel ve geleneksel olmayan diğer kesme sistemleri ile karşılaştırıldığında bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yöntemin, diğer kesme sistemlerine göre karşılaştırılması aşağıda sunulmuştur (El-Domiaty vd., 1996; Xu, 2005; Karakurt vd., 2006).

- i. Çok yönlü kesme ve/veya işleme yapabilmesi: Su jeti teknolojisi ile kırılğan malzemelerden sünek malzemelere kadar özellikle sert ve dayanıklı malzemeler olmak üzere geniş bir yelpazede yer alan malzemelerin kesilmesi/işlenmesi yapılabilir.
- ii. Şekilli kesme/işleme yeteneğinin olması: Yöntem özellikle iki boyutlu kesme ve işleme yapmaya çok uygundur. Farklı açılarda da çalışabildiği için karışık şekilli kesme/işlemeye müsait bir teknolojidir.
- iii. Malzeme yüzeyinde ısıl gerilme ve/veya herhangi bir bozulmaya sebep olmaması: Kesme anında, malzeme yüzeyinde herhangi bir ısıl problemin oluşması söz konusu değildir. Bu özellik, özellikle ısıya duyarlı malzemelerin kesilmesi/işlenmesinde tercih edilme sebebidir.
- iv. Düşük kesme kuvveti gerektirmesi ve kısa sürede üretim yapılabilmesi: Sistem kesme ya da işleme yapabilmesi için oldukça düşük kuvvet gerektirir. Kesilecek

ve/veya işlenilecek malzemenin tezgâha yerleştirilmesi kolaydır. Delme ve kesme/işleme eşzamanlı yapıldığından kısa sürede üretim söz konusudur.

- v. Çevreye karşı duyarlı bir teknoloji olması: Kesme anında ısıl problemi oluşturmaması, yangın çıkma riskini düşürür. Diğer kesme/işleme teknolojilerine nazaran, solunum yoluyla insan sağlığını etkileyecek parçacık ya da toz oluşumu olmaz.
- vi. Montaj ve demontajının kolay olması: Sistem bileşenlerinin birbirine entegre edilmesi ve birbirinden sökülmesi kısa sürede gerçekleşebilir. Kompleks bir yapıya sahip değildir ve sistem bileşenleri diğer sistemlerin bileşenlerine göre daha hafiftir.

Su jeti kesme sisteminin yukarıda sayılan avantajlarının yanında, madencilik alanında ocakta blok işletmeciliğinde çok düzgün ve istenen boyutta blok mermer ve granit üretimine olanak sağlaması gibi bir avantaja da sahiptir. Ayrıca, yöntemde malzeme kaybı oldukça düşüktür. Buda dekoratif üretim amaçlı kullanımlarda diğer kesme/işleme sistemlerine göre önemli üstünlük sağlar. Yöntemin önemli avantajlarına rağmen endüstrideki kullanımını sınırlayan bazı dezavantajları da vardır. Bunlar;

- i. Yüksek ilk yatırım ve işletim maliyeti: Yöntemin ilk yatırım maliyeti oldukça yüksektir. Dekoratif amaçlı ve endüstriyel bazda kullanım için su jeti kesme/işleme fiyatı ortalama 90,000–500,000 \$ arasındadır. İşletim maliyeti ise saatte ortalama 30 \$'dır. İşletim maliyetinin büyük bir bölümünü meme (nozzle) ve aşındırıcı malzeme oluşturmaktadır. Ayrıca, kesme işlemi için harcama süre maliyetin artmasına sebep olacak şekilde uzundur.
- ii. Kesilen/işlenen malzeme özellikleri yöntemin kullanımını sınırlar: Özellikle malzeme kalınlığı bakımından yöntemin kesme/işleme kapasitesi sınırlıdır. Çok kalın malzemelerin kesilmesinde istenen şeklin elde edilmesi zordur ve kalın malzemelerde malzeme alt taraflarında kopmadan kalan parçalar olabilmektedir.
- iii. Kesilen malzemelerde yöntemin kendine özgü bir kerf (yarık) yapısı oluşturması: Yöntemin kesilen malzemelerde oluşturduğu kerf (yarık) açısı kesme kanalında oluşan eğimin açısıdır ve işleminin düzenli olup olmadığını ifade eder. İstenmeyen bir parametre olan kerf açısı, kesme sonrası malzemede ikincil işlem gerektirir. Ayrıca yöntemle kesilen/işlenen malzemelerde kesme kanalı köşelerinde kavislikte oluşur ki buda malzemenin ikincil bir işleme tabi tutulmasına sebep olur.

- iv. Sistemde meydana gelen gürültü: Yöntemde, malzeme kesilmesi/işlenmesi esansında mekanik ve aerodinamik olmak üzere rahatsız edici iki türlü gürültü ortaya çıkar. Mekanik gürültünün kaynağı, yöntemin gücünün ve yüksek basıncın sağlandığı motor ve pompa sistemidir. Aerodinamik gürültü kaynağı ise yüksek hızı ve basınçlarda memeden çıkan jettir. Bu gürültü özellikle yüksek meme-örnek mesafelerinde daha çok belirgindir.
- v. Meme (nozzle) ömrünün kısa olması: İşletim maliyetinin önemli bir bileşeni olan memede, özellikle aşındırıcı su jeti ile kesilme işlemlerinde aşındırıcı parçacıklarının teması sonucu yüksek aşınmalara söz konusudur. Aşınan meme düzensiz kesmelere sebep olabilecektir. Bu durum da meme işletme maliyetini arttıracak etki yapar.

1.7. Su Jeti ile Kesmenin Madencilikte Kullanım Alanları

Madencilik alanında ilk olarak yumuşak kayaların kazılmasında kullanılmaya başlanan su jeti, kömürün hidrolik madenciliği ile bu alandaki kullanımını arttırmıştır. Günümüzde ise daha çok doğal taşların hassas kesim çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntemin doğal taşların kesilmesinde kullanımını açısından en önemli avantajları kesme kaybının az olması ve çok farklı şekillerde (eğri, zikzaklı ve benzeri kenarlı) kesmeye imkân sağlamasıdır. Oluşturulabilecek desen ve motifler insan hayal gücü ile sınırlıdır (Kulaksız, 2005). Ek olarak delik delme, boyut küçültme ve ocaklarda doğal taş blok çıkarma süreçlerinde de kullanılan su jeti kesme/işleme yöntemi, madencilik alanındaki kullanım alanının giderek arttırmaktadır. İzleyen bölümde, yöntemin kullanım alanlarına yönelik bir değerlendirme sunulmuştur.

1.7.1. Kömür Madenciliği

Su jeti teknolojisinin kullanıldığı hidrolik kazı yöntemi, kömür işletmeciliği alanında başarıyla uygulanmaktadır. Hidrolik Madencilik, cevherin arından su gücüyle kazılmasından su-cevher karışımının hidrolik olarak taşınmasına kadar olan tüm çalışmaları kapsar (Parkes ve Fişekçi, 1984; Jianchi, 1991). Özellikle bilinen işletme yöntemleri ile işletilemeyen çok ince ve çok kalın damarlarda hidrolik üretim yöntemleri ekonomik ve güvenli bir işletme olanağı sunmaktadır. Nispeten yumuşak kömürler saf su jetleri ile kazılabilirken sert ve çok sert kömürlerin kazısı, bilinen kazı araçları ile birlikte



Şekil 1.14. Granit ocağında kullanılan su jeti kesme makinesi (Ferris ve Hall., 2004)

Büyük miktarda su ve ekipman çalışabilirliğinin temiz bir çevre gerektirmesi gibi özellikler, yöntemin ocakta kullanımını sınırlamaktadır. Bu tür olumsuzlukların ortadan kaldırılması son yıllarda geliştirilen ve bir su jeti tasarımı olan DIA jetlerle mümkün olabilmektedir (Yazıcı ve Summers, 1989). Aşındırıcı besleme şekli farklı olan ama daha düşük basınçlarda (70 MPa) çalışma olanağı sunan DIA jetler, aşındırıcı geri kazanımının söz konusu olduğu durumlarda avantajlı olması nedeniyle de tercih edilebilmektedir (Agus vd., 1995).

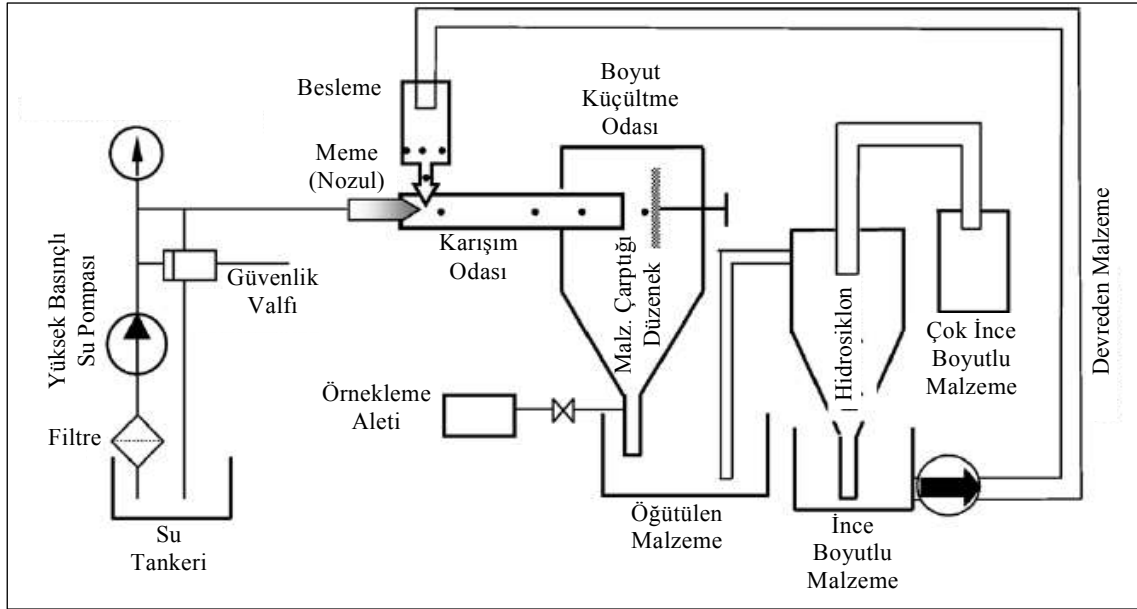
Geleneksel kesme yöntemleri ile kesilip işlenen doğal taşlarda kesme yüzeylerinin temizlenmesi, kesim hattı boyunca oluşan çatlaklıkların ya da kırıkların düzeltilmesi gibi ikincil işlemler gerekir. Su jeti teknolojisi ile kesim sonrası yeniden işleme gereksinimi ortaya çıkmamaktadır. Ayrıca, yöntemde kesme aralığının dar olması nedeniyle malzeme kaybı oldukça azdır. Su jeti teknolojisi ile doğal taş kesme ve işlemede ikincil işlemler gerekmemesi yöntemin uygulanabilirliğini arttırmaktadır (Bortolussi vd., 1989).

1.7.3. Boyut Küçültme

Geleneksel öğütme sistemleri yüksek miktarlarda enerji gerektirdiği için verim açısından sıkıntılı sistemlerdir. Sıradan bir bilyalı değirmende 2 mm boyutundaki kömürün

20 μm boyutuna indirmek ortalama iki saat sürmektedir. Öğütme işlemi tekrar isteyen bir süreçtir. Bu işlemin tekrar tekrar yapıldığı düşünüldüğünde harcanan enerji miktarını tahmin etmek çok daha kolay olacaktır. Ayrıca mevcut öğütme sistemlerinde beslenen malzeme tane şeklinin, öğütme sonrası tahrip edilmesi ve malzeme kirlenmesi de söz konusudur (Longlian vd., 2006).

Yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme, hemen her alanda kullanılabilen yüksek basınçlı su jeti teknolojisinin bir koludur ve düşük enerji gerektirmeleri nedeniyle boyut küçültme işlemlerinde uygulanabilirliği araştırılmaktadır. (Kuyumcu ve Rolf, 2004). Şekil 1.15’de yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme yöntemi şematik olarak resmedilmiştir.



Şekil 1.15. Yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme yöntemi şematik gösterimi (Longlian vd., 2006).

Boyut küçültme mekanizması geleneksel sistemlere göre farklı olan yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme işleminde sisteme beslenen malzeme, yüksek hız nedeniyle sistem içindeki bir düzeneğe çarpar ve küçük parçalara ayrılır. Böylelikle geleneksel sistemlerde olduğu gibi malzeme topaklanması ya da kirlenmesi söz konusu değildir. Yüksek basınçlı su jeti ile boyut küçültme işleminin önemli avantajları arasında; düşük enerji gerektirmesi, malzeme kirliliğinin olmaması, toz ve çevresel kirlilik probleminin ortadan kalkması, beslenen malzemenin orijinal kristal şeklinin korunması ve düşük ekipman aşınması gibi özellikler sayılabilir (Galecki ve Mazurkiewicz, 1989; Longlian vd., 2007).

1.7.4. Delik Delme ve Tünel Açma

Madencilikte, zaman ve maliyet açısından kar sağlamak için sondaj veya ateşleme deliklerinin hızlı ve ekonomik olarak açılması istenir. Delik delme ve sondaj işlemleri oldukça zaman alır ve maliyeti arttırır. Bu nedenle son yıllarda yeni delik delme metotları geliştirilmektedir. Su jeti teknolojisi delik delme ve tünel açma işlemlerinde de kullanılmaktadır. Delme işlemi sadece su jeti ile yapılabildiği gibi su jeti memelerinin mekanik delicilere yerleştirilmesiyle uygulanan yardımcı yöntem olarak da kullanılabilir. Özellikle matkap uçlarına belirli bir düzene göre yerleştirilen su jeti memeleri (nozulları) delik delme verimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Maurer ve arkadaşlarının (1974) yürüttüğü bir çalışmada, matkap uçlarına yerleştirilen memeler ile delik delmede normal delik delmeye göre daha fazla ilerleme kaydedildiği görülmüştür. Benzer şekilde, madencilikte geleneksel patlayıcılarla yapılan kayaç parçalama işlemine alternatif yöntem olarak geliştirilen su jeti ile kayaç parçalama çalışması yapan bir grup araştırmacı, mevcut delikler içerisinde yüksek basınçlı su jetleri ile hidrolik çatlaklandırma yapmanın patlatma verimini önemli ölçüde etkileyeceğini belirtmişlerdir (Genet vd., 2008; Summers vd., 1992). Metal madenlerinde seçimli kazı çalışmalarında cevher ya da yan kayaç içerisinde patlatmaya yardımcı olabilecek delik ya da yarıkların oluşturulması amacı ile de yüksek basınçlı su jetleri kullanılabilir. Bu tür delik delme işleminde daha küçük çaplı delikler delinebilmekte ve kayaç-ekipman arasında herhangi bir fiziksel temas olmadığından yöntemde delici uç aşınma problemi de olmamaktadır (Savanick ve Krawza, 1996; Xu vd., 2009). Düşük basınçlarda çalışma olanağı sunması nedeniyle geleneksel su jeti kesme yöntemine göre avantajlar sunabilen DIA jetler, geleneksel yöntemlerle delinemeyen kayaçların daha düşük basınçlarda delinmesine de imkân tanır. Ayrıca aşındırıcı tüketimi daha azdır (Engin, 2006).

1.8. Literatür Özeti

Kullanım alanı son yıllarda genişleyen su jeti ile kesme yöntemi ile ilgili araştırmalar farklı malzemelerde elde edilebilecek kesme performansı yada belli bir malzemenin kesilmesi için optimum çalışma parametrelerinin tanımlanması, farklı malzemelerde su jeti ile kesmenin mekanizması ve kesme kalitesinin etkileyen malzeme ve çalışma parametrelerinin tanımlanması olarak yapılmıştır. Erken dönem çalışmaları yöntemin

geleneksel kesme yöntemlerine göre verimli kesme sağladığı ortak sonucunu göstermektedir. Ancak su jeti ile kesmenin henüz gelişme aşamasında bir yöntem olması nedeniyle yapılan çalışmaların henüz genel konular üzerinde yoğunlaştığı söylenebilir.

Literatürde su jeti ile kesme yönteminde, kesme sırasında kullanılan elemanlardan pompaların çalışma şartlarına, madencilik endüstrisinden gıda endüstrisine, işlenmesi zor metallere cam gibi kırılabilir malzemelerin kesilmesi ve işlenmesine kadar geniş bir yelpazede çalışmalar bulunmaktadır.

Su jeti kesme sistemlerinin kayaçların kesilmesinde kullanılabilirliği konusunda erken dönem çalışmalarından birisi Bortolussi vd. (1988) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bortolussi ve arkadaşları su jeti sistemlerinin granitlerin kesilmesindeki performansını araştıran ilk araştırmacılar arasında yer almaktadır. Araştırmacılar, ilk aşamada, saf su jeti sistemlerinin kesme performansını etkileyen parametreleri belirlemişlerdir. Daha sonra bu parametreler ile su jeti sistemlerinin kesme performansı araştırılmıştır. Sonraki aşamada aşındırıcı ilavesinin oluşturduğu performans değişimi gözlenmiştir. Deney çalışmalarında kullanılan granit örnekleri farklı su jeti basınç değerleri, meme çapları, kesme hızları kullanılarak kesilmiş ve her bir aşamada kesme derinliği ile kesme genişliği ölçülmüştür. Bortolussi vd. (1988), yüksek basınçlı su jetlerinin granitlerin (ya da kayaçların) kesilmesinde ticari olarak pratik bir kesme yöntemi olduğunu, ayrıca aşındırıcı ilavesinin granit kesme performansını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Hagan (1992), şeyl ve kumtaşı örnekler kullanarak gerçekleştirdiği araştırmada, çalışma parametrelerinin değişiminin kesme performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Hagan, kesme performansı üzerinde en etkin parametrenin jet basıncı olduğunu belirlemiştir. Su basıncından sonra önemli parametrelerin ise kesme (ilerleme) hızı ve meme çapı olduğunu kaydetmiştir. Meme çapının en önemli etkisinin kesme genişliği üzerindeki belirleyiciliği olduğunu ifade eden Hagan (1992), kesme genişliğinin düşük basınçlarda artan meme çapı ile birlikte arttığı ancak bu artışın yüksek basınçlarda daha önemli değerlere ulaştığının vurgulanmıştır. Belli bir değerden (optimum meme çapı) sonra meme çapı artışının önemli bir etkisinin olmadığı ve optimum meme çapının basınç artışı ile artış gösterdiği de yapılan çalışmanın önemli sonuçlarından.

Miranda ve Quintino (2005), malzeme özelliklerinin kalkerli kayaçların aşındırıcı su jeti ile kesilebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Köken, yapı ve mekanik özellikleri farklı iki kireç taşı ile yapılan deneyler sonucunda iki kayacın farklı davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. Kayaç sertliğinin ve boşluk oranının kesme performansı üzerinde

önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilen çalışmada kesme/aşınma mekanizmaları için önemli bir ilişki belirlenmemiştir. Her iki kayacın kesilen yüzeylerinin düzgünlükler farklılıklar göstermiştir. Kristalin mermerler gibi sert ve homojen malzemelerde kesmenin taneler arası değme yüzeyleri boyunca ve kalsitik tanelerin yerinden ayrılması şeklinde gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Kireç taşında ise kesmenin tanelerin de kesildiği bir süre olarak geliştiği görülmüştür.

Liu ve Chen (2004) ise jet basıncı, aşındırıcı miktarı, kesme hızı ve jet çapı gibi parametrelerin kesme mekanizması ve kesme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Granit örneklerin kullanıldığı deneylerde akustik yayılım (AE) ölçümleri ile farklı sinyal özellikleri analiz edilerek, yüksek yüzey kalitesi ve verimli kesme amaçları için bir kılavuz önermişlerdir. Bir başka araştırmada Huang vd. (2006) granit örnekler kullanarak aşındırıcı su jeti sistemlerinin çalışma parametrelerinin kesme kalitesi ve kesme verimliliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla jet basıncının artırılmasının sadece yarı genişliğini arttırdığını belirten araştırmacılar yarı ağzındaki kavisliliğin azalan basınçla arttığını belirlemişlerdir. Yüzey kalitesi, kesme derinliği ve yarı ağzı kavisliliğinin kabul edilebilir değerlerde olmasını sağlamak üzere etkin parametrelerin bazılarının birlikte değiştirilmesini öneren araştırmacılar kesme yüzeylerindeki pürüzlülüğün kesme hızı ve basınç parametrelerinin kontrolünde değiştiğini belirlemişlerdir.

Savanick ve Krawza (1996), aşındırıcılı su jeti sistemlerinin özellikle metal madenlerinde seçimli kazı çalışmalarında cevher yâda yan kayaç içerisinde patlatmaya yardımcı olabilecek delik yâda yarıkların oluşturulmak üzere kullanılmasının etkilerini araştırmışlardır. Araştırmacılar, aşındırıcı malzeme ilave edilmiş su jetlerinin saf su jetlerine göre daha az basınçla çalışabileceğini belirlemişlerdir. Saf su jeti ile kayaçta delik yâda yarı oluşturmak için gerekli basıncın kayaç basınç dayanımından büyük olduğu halde, aşındırıcı ilave edilmiş su jetleri ile daha düşük su basıncı değerlerinde etkin bir kazı ya da delme performansı elde edilmiştir. Bu tür delik delme yâda yarı oluşturmada fiziksel bir temas olmadığından geleneksel delme sistemlerinde olduğu gibi kayaç ile delici arasında bir etkileşim olmayacağı ve delme işleminin daha verimli yapılacağı belirtilmektedir. Bu sistemle gerçekleştirilen delme işlemlerinde bir delici uca gerek olmadığından uç aşınma probleminin de ortadan kalktığı öne sürüldüğü çalışmada araştırmacılar aşındırıcı su jeti ile daha küçük çaplı delikler açılabileceğini de belirtmişlerdir.

Barre graniti kullanılarak gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada kayaç anizotropisinin su jeti ile kesme performansına etkileri araştırılmıştır (Summers ve Peters, 1974). İlk aşamada kayaç yöneliminin su jeti ile kesme performansı üzerine etkileri araştırılmış ikinci aşamada ise granit örnekleri meme altında sırayla döndürülerek değişen yönelimlerde meydana gelen değişim izlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre su jeti yönü ile dikey olan örneklerde yapılan kesme yâda yarık açma işleminde açılan delikler yâda yarıklar geniş olurken su jetine yâda örneğe açı verildikçe daha dar delik yâda yarıklar elde edilmiştir. Çalışma, kayaç ve su jeti temas açısının kesme performansında etkili olduğu ve kısmen azalan su basıncı, artan meme çapı ile birlikte Barre granitlerinin su jeti ile verimli bir şekilde kesilebileceğini göstermiştir.

Momber (2004), kayaç ve kayaç gibi sert bazı çimento bileşimli malzemelerde malzeme yüzeyinde oluşan aşınma ve erozyon mekanizmasını açıklayan bir çalışma yapmıştır. Kesme işleminde etken olan erozyon mekanizması üzerinde yoğunlaşan çalışmada triboloji prensiplerinin kesme anında oluşan erozyon ve aşınma mekanizmasını açıklamak için kullanılabileceği belirtilmiştir. Ek olarak, aşınma ve erozyon mekanizmasının seçimli bir yolla meydana geldiği bunda da etken olan parametrenin kayacın yapısında var olan kırık, çatlak gibi yapısal kusurların olduğu ve bu parametrelerin aşınma ve erozyon mekanizmasına olumlu yönde etki ettiği belirlenmiştir. Çalışmanın bir başka önemli sonucu da her kayacın su jeti ile kesilebilmesi için belirli eşik değerlerin olduğu ve kayaç içinde meydana gelen doğrusal olmayan çatlak yâda kırıkların aşınma işleminde önemli bir yeri olduğudur.

Ma ve Deam (2006), en uygun kesme hızı ve kesme kalitesi için temel alınabilecek bir tolerans değerinin belirlenmesini amaçladıkları çalışmalarında, diğer parametreler sabit tutularak kesme hızı değişimi ile kesik geometrisi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Kesme hızının 1–2 mm/sn aralıklarla artışı ile kesik geometrisinin ıraksaklıktan yakınsaklığa doğru bir değişim gösterdiği ve yüzey dalgalılığının da yüksek hızlarda belirginleştiği görülmüştür. Kesme genişliği ve derinliği ile hız değişimi arasında 200 mm/sn'nin altı ve üstündeki hızlar için tanımlanan iki farklı korelasyon yanında bir de genel korelasyon tanımlanmıştır. Çalışmanın genel bir sonucu olarak meme-örnek arası mesafenin artışı ile kesik genişliğinin arttığı belirlenmiştir.

Son dönem çalışmalarından biri olan Genet vd. (2008)'nin yaptıkları çalışmada, suyun darbe etkisinden yararlanılarak kayaç parçalanma işleminin gerçekleştirilebilirliği araştırılmıştır. Geleneksel bir yöntem olan patlayıcılarla kayaç parçalanma işleminde; taş

fırlaması, gürültü, zemin kontrollünün zorluğu, çevre üzerindeki olumsuz etkiler, hava şoku, zehirli gazların açığa çıkması, karmaşık delme-patlatma işleminin gerekmesi, alanın boşaltılması gibi olumsuzluklarının olması araştırmacıları bu işleme alternatif bir yöntemin araştırılmasına sürüklemiştir. Araştırmacılar böylelikle günümüz madenciliğinin vazgeçilmezi olan patlayıcılarla kayaç parçalanma işlemine alternatif bir yöntem geliştirmeyi ve yaygınlaştırmayı amaçlamışlardır. Kayaç ve sistem özellikleri etkileşiminin çalışıldığı bu araştırmada, delik içerisinde hidrolik çatlaklandırma ile parçalanmada, delik dibi geometrik şeklinin önemli etkisinin olduğu, sistem pistonundan çıkan yüksek hızlı suyun başlangıç kinetik enerjisinin hidrolik parçalanmada önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Radu vd., (2006)'da laboratuarda mermer ve bazı sert kayaçlar kullanarak yaptıkları çalışmada, saf ve aşındırıcı su jeti ile kesmede bazı çalışma parametrelerinin kesme verimi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Saf su jeti ile kesim çalışmasında, su jeti hızının malzemeye giriş açısı, jet basıncı, meme (nozül) çapı ve meme-örnek mesafesi değişiminin etkisi incelenirken, aşındırıcı su jeti ile kesme çalışmasında aşındırıcı yoğunluğu, aşındırıcı tane boyut dağılımı ve meme (nozül) çapı değişiminin etkisi incelenmiştir. Araştırmacıların, kesme verimini etkileyen en önemli kayaç ve sistem parametrelerinin belirlenmesini amaçladıkları çalışmada, optimum verim için gerekli değerler elde etmişlerdir. Örneğin, su jeti hızının malzemeye dik açıyla giriş yapmasıyla en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Benzer şekilde meme-örnek mesafesinin artmasıyla kesme derinliğinde düşüşler olmuş, meme çapının artışı kesme derinliği ve kesme genişliklerini artması yönünde etki etmiştir. Ayrıca, aşındırıcı tane dağılımının büyük olduğu deney çalışmasında büyük yarıklar elde edilirken, aşındırıcı miktarı olarak bazı optimum şartlar sağlanmıştır.

Hlavac vd., (2009)'nin mermer ve granitinde bulunduğu birkaç çeşit malzemenin aşındırıcı su jeti kesilmesine yönelik çalışmalarında, kesim sonrası yüzey kalitesini deneysel olarak araştırmışlardır. Kesim sonrası yüzeyde oluşan çiziklerin eğim açısının ölçüldüğü çalışmada, eğimli ve eğimsiz kesme kafası kullanılmıştır. Ayrıca, eğimli kesme kafası kullanılarak yapılacak kesme işleminde belirli eğim açıları için teorik model geliştirilmiş ve deneylerden elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile teorik modelden elde edilen sonuçların uyumluk içerisinde olduğu görülmüş ve teorik modelden bazı kesme parametre değerlerinin (kesme hızı) hesaplanmasının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşındırıcı besleme şekli farklı olan ama daha düşük basınçlarda (70 MPa) çalışma olanağı sunan DIA jetler ile yapılan bir çalışmada (Agus vd., 1995), proses parametrelerinin ve aşındırıcı tipi etkisi araştırılmıştır. Ticari olarak bilinen mermer ve granit örneklerinin kullanıldığı çalışmada, kesim sonrası örnek kesme genişlikleri (jet girişi ve çıkışında) ve kesme yüzeyi alt kısmında minimum ve maksimum dalgalanma büyüklüğü performans göstergesi olarak ölçülmüştür. Çalışmanın sonuçlarına göre, kesme hızındaki artış jet giriş genişliğini düşürmüştür benzer durum jet çıkış genişliğinde de gözlenmiştir. Aşındırıcı artışı ile jet çıkış tarafında artan dalgalanma, kesme hızı ile birlikte düşüş göstermiştir. Örnek kesme yüzeyi alt kısımlarındaki pürüzlülüğün düşük kesme hızlarında aşındırıcı besleme oranına bağlı olduğu ise çalışmanın bir diğer sonucudur. Meme-örnek mesafesinin artmasıyla kesme performans göstergelerinde önemli oranlarda düşüşler olmuştur. Kullanılan aşındırıcı çeşidine göre, mermer ve granitte farklılık olsa da tüm kayalık örneklerde garnet aşındırıcı çeşidi ile verimli sonuçlar elde edilmiştir. Bakır cürufunun aşındırıcı olarak kullanıldığında yüksek besleme oranlarında bile özellikle granit örneklerde kötü sonuçlara ulaşılmıştır. Kuvars kumunun aşındırıcı olarak kullanıldığında granit için kabul edilebilir sonuçlar elde edilirken, mermer örneklerde diğer aşındırıcı çeşitleri ile daha olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Araştırmacılar, aşındırıcı geri kazanımının daha kolay, düşük basınçlarda çalışma olanağının bulunması nedeniyle DIA jetlerin ticari olarak kullanılabilirliği de önermişlerdir.

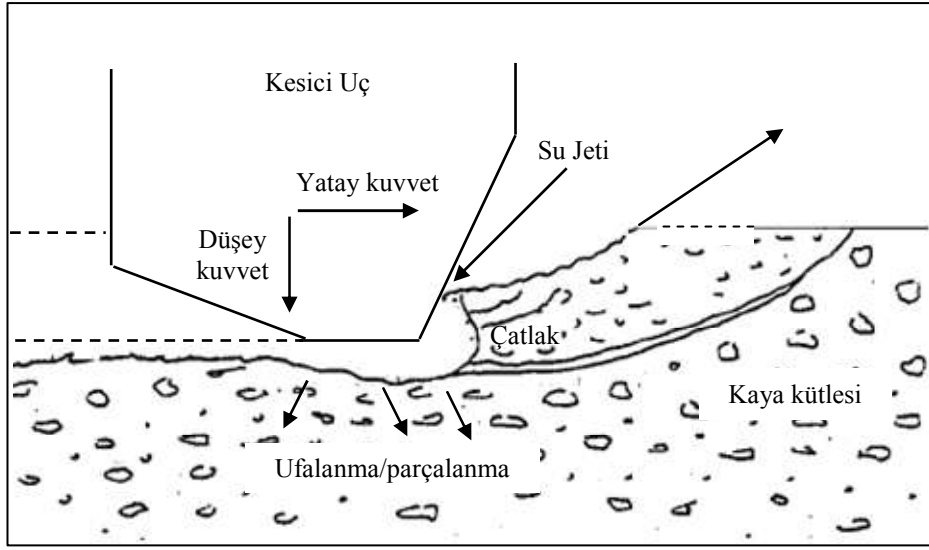
Granit ocaklarında blok üretim ya da delik delme işlemlerinde su jeti sistemlerinin kullanımına yönelik laboratuvar ve saha çalışması yapılmıştır (Bortolussi vd., 1989). Araştırma laboratuvar ve saha şeklinde gerçekleştirilmiş, laboratuvarda bazı İtalyan granitleri kullanılmıştır. Ocakta blok üretiminde geleneksel üretim yöntemlerinin olumsuzlukları nedeniyle, su jeti kesme sistemlerinin bu boşluğu doldurabileceğini hem kendi yaptıkları çalışmalara hem de geçmiş deneyimlere dayanarak belirten araştırmacılar, özellikle sistemin ekonomik olarak üstünlük sağladığına yönelik çalışmaların yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu sistemlerin özellikle ocakta kullanımında kesme işlevini yerine getirmek için yüksek hidrolik enerji gerektirmesinin işletim giderlerini arttırdığını ifade etmişlerdir.

Dia jetlerin kayalık kesilme işlemlerinde kullanımını yaygınlaştırmak amacıyla Gürcistan graniti kullanılarak yapılan çalışmada (Yazıcı ve Summers, 1989), bazı çalışma parametrelerinin kesme performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Performans göstergesi olarak abrasive aşındırma verimi ve spesifik enerjinin temel alındığı çalışmada, çalışma

basıncı, aşındırıcı besleme miktarı, meme çapı, kesme hızı ve abrasive özelliklerinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Araştırmanın önemli sonuçları şu şekilde sıralanabilir; örnek kesme derinlikleri basınç, aşındırıcı besleme miktarı, aşındırıcı boyutu ve sertliğinin artmasıyla artış göstermiş, kesme hızının artmasıyla azalmıştır. Basınç ve aşındırıcı sertliğinin kesme derinliğini kontrol eden en etkin parametre olduğu görülmüştür. Meme aşınmasının küçük çaplı meme, büyük boyutlu ve sert aşındırıcı malzeme kullanımı durumunda fazla olmuştur. Artan kesme hızlarında, spesifik enerji düşerken abrasive aşındırma verimi artmıştır. Aşındırıcı boyutu artışı, aşındırma verimini arttırmış ve spesifik enerjinin düşmesine sebep olmuştur. Meme çapının artması spesifik enerjiyi arttırma yönünde etki etse de abrasive aşındırma verimini üzerinde net bir etkiye sebep olmadığı çalışmanın öne çıkan bir diğer sonucudur.

Foldyna ve arkadaşlarının (2004) yüksek basınçlı su jeti uygulamalarında ultrasonik ses dalgalarının kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, beş farklı malzeme kullanarak ses dalgalarının kesme performansına etkilerini ortaya çıkarmayı amaçlamışlardır. Kumtaşı, granodiyorit ve mermer örneklerinin de kullanıldığı çalışma, laboratuvar ortamında yapılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Ses dalgalı tasarım ve geleneksel tasarımla yapılan deney çalışmasında, elde edilen sonuçlar performans değerlendirilmesi için karşılaştırılmıştır. Metal malzemelerin ses dalgalı su jeti tasarımı ile kesilebilirliğinin olumlu sonuçlar getirdiği, ses dalgalı tasarım ile yapılan kesme deneylerinde yumuşak çelik gibi malzemelerin kesilmesinin 40 MPa basınçta mümkün olabileceğini görmüşlerdir. Metal malzemelerde şekil ve derinlik yönünden düzensiz bir kesme sağlansa da malzeme kaybının oldukça az olması çalışmanın bir diğer önemli sonucudur. Benzer şekilde kayaç örneklerinin ses dalgalı su jeti ile kesilebilirliğinde, kumtaşı ve granodiyoritte oldukça düzenli yarıklar elde edilmiş buna karşın geleneksel su jeti ile kesmede hem derinlik hem de şekil bakımında çok daha düzensiz kesme elde edilmiştir. Öte yandan ses dalgalı tasarım ile kesmede örnek kesme derinliklerinin kumtaşı ve granodiyoritte daha derin olduğu görülmüştür. Mermer örnekleri ile yapılan çalışmalarda ise her iki tasarım ile de benzer durumlar gözlemlense de aradaki fark pek açık değildir. Araştırmacılar, ses dalgalı tasarım ile kayaç kesme işleminde kesme performansının arttırılması için çalışma basıncı ve kesme hızı gibi bir takım proses parametrelerinin iyileştirilmesine gerek olduğunu belirtmişlerdir. Laboratuvar çalışmalarının hala devam ettiği araştırmada, yazarlar bu yöntemin birçok alanda kullanılmasını yaygınlaştıracak araştırmalara ihtiyaç olduğunu belirtmektedirler. Vijay (1991) kayaçlarda

delme ve blok üretimler için yarıkların oluşturulması amacıyla, saf ve aşındırıcı su jeti ile bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmacı, yürüttüğü çalışma sonucunda kayalarda delik delme ya da yarıkların oluşturulması işlemleri için kullanılacak saf ve aşındırıcı katkılu su jetlerinin yüksek basınçta ve güçte olması gerektiğini ifade etmiştir. Bazı kayaların özelliklerinin aşındırıcı su jeti kesme performansına etkisini araştırmak amacıyla, Agus ve arkadaşları (1993) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Farklı granit örneklerinin kullanıldığı çalışmada, mineral sayısı fazla olan kayalarda kesme performansı için mineral bileşiminin önemli rol oynadığı tespit edilmiştir. Buna karşın, az sayıda mineralden oluşan kayalarda da kesme performansının kayaların porozitesinden önemli ölçüde etkilendiği ifade edilmiştir. Miranda ve arkadaşlarının (1993) yürüttüğü bir çalışmada, aşındırıcı su jeti ile malzeme uzaklaştırma karakteristikleri ile malzeme özellikleri arasındaki ilişki tespit edilmeye çalışılmıştır. Kalkerli kayaların kullanıldığı çalışmada, kayaların sertliğinin malzemede kesme geometrisinin oluşmasında önemli rolü olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, kayaların kesme mekanizmasında baskın karakter olarak kayaların sertliği yanında porozitenin de etken oluşu araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Suyun darbe etkisinden yararlanılarak yeraltı metalik madenlerinde kayaların gevşetme işlemlerinde kullanılabileceğini ifade eden Vijay ve arkadaşları (1993), Kanada'da metalik bir madende kayaların kazı makinelerinin ucuna yerleştirdikleri su jeti memeleri ile bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, klasik kazı makineleri ile yapılan kazılarda, su jeti kullanımının kayaların gevşetmeye yardımcı olması nedeniyle faydalı sonuçları olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 1.16). Lauand ve arkadaşları (2001) granit ve mermer örneklerini kullanarak su jeti kesme sistemlerinin kayaların kesme performanslarını araştırmışlardır. Araştırmacılar, kesme performans göstergesi olarak elde ettikleri kesme derinliklerini değerlendirdiklerinde özellikle granitlerde farklı derinlikler elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Bunu da kayaların içerdiği minerallerin farklı oranlarda bulunmasıyla ilişkilendirmişlerdir.



Şekil 1.16. Kayaç kazısında kesici uç ile su jetinin birlikte kullanımı (Dubugnon, 1981)

Bortolussi ve arkadaşları (1991) titreşimli meme kullanarak su jeti ile granit örneklerde delik delmek için jet gücünün optimizasyonunu yapmışlardır. Bazı işlem parametrelerinin test edildiği çalışmada, su jeti ile açılan deliklerin derinliği ölçülmüştür. Araştırmacılar, birden fazla meme kullanılması durumunda düşük spesifik enerjinin jet gücünün memelere eşit dağıtılması ile elde edilebileceği belirtilmiştir. Kullanılacak memelerin çaplarının büyük olmasını öneren araştırmacılar, aksi taktirde verimin düşeceğini ifade etmişlerdir. Vasek ve Foldyna (1991) su jeti teknolojisinin metro tünel inşaatında kaplama betonlarda delik delinmesi, kazı amacıyla yapılacak patlatmalar için kayaç formasyonlarında delik delinmesi gibi işlemlerde kullanılabilirliğini test etmişlerdir. Arazi ve laboratuvar çapta yapılan çalışmalarda, araştırmacılar ayrıca, granit, kumtaşı, traverten ve mermer örneklerde kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, su jeti teknolojisinin tünellerde delik delme işlemlerinde kullanılabileceğini belirten araştırmacılar, granit, mermer, traverten gibi kayaçlarda da su jeti kesme performansının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir. Özellikle Japonlar tarafından yapılan araştırmalarda, darbeli delik delme makineleri ile su jetinin birlikte kullanılarak delik delme çalışmaları yapılmıştır (Nagano vd., 1974; Hoshino vd., 1976; Nagano vd., 1978). Delme ucuna yerleştirilen püskürtme memeleri yardımıyla delik dibine yüksek basınçlı su verilerek ön gevşeme sağlanmıştır. Araştırmacılar, bu yöntemle bilinen delik delme yöntemlerine göre 2-5 kat daha fazla bir ilerleme hızına ulaşılabileceği kaydetmişlerdir. Su jetinin özellikle kömür madenlerinde tamburlu kesicilere monte edilerek su jeti destekli verimli kazı

çalışmaları yapılmıştır (Handewith et al., 1985; Thimons et al., 1987). Taylor ve Thimmons (1989) kayaçların mekanik kazılmasında mevcut ekipmanlara su jeti memelerinin yerleştirilmesinin keski uç ömrünü iki kat arttırdığını belirtmişlerdir. Benzer bir tespit, Hood vd. (1991) tarafından yapılmıştır. Sert kayaçların kazısında normalde kesici uç ömründen bahsedilmezken, su jeti kullanımı durumunda kayda değer bir uç ömrü olduğu Hood ve arkadaşları tarafından ifade edilmiştir. Tünel açma çalışmalarında, kazıcı ekipmanlarla birlikte su jetinin kullanımı durumunda makina titreşiminin kabul edilebilir seviyelere gerilediği Fowel ve arkadaşları (1988) tarafından yapılan bir çalışmayla ortaya konulmuştur. Madencilikte, üretim amaçlı hemen her türlü kazı çalışmalarında toz problemi ciddi problemler oluşturur. Geleneksel su spreji yöntemleri ile bu problemin minimum düzeye indirilmesi sağlanır. Taylor ve arkadaşları (1989), kayaç kazı çalışmalarında geleneksel su sprejileri ile birlikte su jeti teknolojisinin kullanımını test etmiştir. Araştırmacılar, su sprejileri ve su jetinin birlikte kullanımının açığa çıkan toz oranının % 80 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Dört farklı kökenden kayaçlarda, aşındırıcı katkılı su jeti ile delme çalışmaları yapılmıştır (Savanick ve Krawza, 1989). Araştırmacılar, aşındırıcı su jetinin geleneksel mekanik delme sistemleri ile karşılaştırıldıklarında, oldukça düzenli delikler açılabilirdiği belirtmişlerdir. Ayrıca, mekanik delme sistemlerinin kullanımının zor olduğu kırıklı, çatlaklı formasyonlarda aşındırıcı su jeti ile verimli delme çalışmalarının yapılabileceği ifade edilmiştir.

Madencilikte, saf ve aşındırıcı su jeti uygulamaları sadece kayaç kesme/işleme ile sınırlı değildir. Madencilğin farklı olanlarında da su jeti başarılı uygulama alanlarına sahiptir. İzleyen paragraflarda su jeti teknolojisinin madencilğin farklı alanlarındaki uygulamalarına örnekler sunulmuştur.

Lu vd., (2009) gaz içeriği yüksek kömür damarlarında metan drenaj veriminin artırılması için su jeti ile kesme yönteminin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Araştırmacılar laboratuvar, sayısal modelleme ve ocak çalışması şeklinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında su jeti ile kesmenin gaz drenaj verimini arttırdığı sonucuna varmışlardır. Ocak çalışması esnasında mevcut drenaj kuyularında yapay çatlaklandırma yaparak, gaz geçişini kolaylaştıracak yolların açılmasını sağlayan uygulamada, madencilik öncesi ve madencilik esnasındaki gaz drenaj verimi araştırılmıştır. Özellikle madencilik faaliyetlerinin devam ettiği sürede gaz verimi artmıştır. Teorik çalışmadan meme (nozül) çapının, uzunluğunun ve jet akış açısının su jeti ile delme işlemi üzerinde etkili olduğu gerçeği ise araştırmanın bir diğer önemli sonucudur.

Yüksek basınçlı su jetlerinin boyut küçültme işlemlerinde kullanılabilirliğini araştıran çalışmalarda (Cui vd., 2006), bazı proses parametrelerinin ve jet çıkış çeşidinin (Galecki ve Mazurkiewicz, 1989) boyut küçültmeye etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmacılar, kömür örneklerinin kullanıldığı çalışmalarında, her bir proses parametre değişimi ile elde edilen verileri performans göstergesi temelinde değerlendirdiklerinde yüksek basınçlı su jetlerinin geleneksel öğütme sistemlerine göre düşük enerji tüketimi ve yüksek verimleri nedeniyle boyut küçültme işlemlerinde kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Çalışma parametrelerinin değişimi ile kesme performans parametreleri arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmalara ek olarak önemli bir araştırma alanı da aşınma mekanizmasının açıklanmasıdır. Aşınma mekanizmasının açıklanmasına yönelik araştırmalar tasarım ve çalışma parametrelerinin yanı sıra, farklı türden malzemelerin özelliklerinin aşınma mekanizması üzerindeki etkilerini belirlemeyi amaçlamıştır.

Metal malzemelerde kesme sürecinde etkin deformasyon mekanizması plastik deformasyon iken seramik gibi kırılabilir malzemelerde malzeme yüzeyinden parçacıkların ayrılmasında yüzey çatlakları ve onları izleyerek malzemenin iç kısımlarına doğru meydana gelen çatlaklar etken olmaktadır (Arola and Ramulu, 1996; Gudimetla vd., 2002). Araştırmacılar, endüstriyel seramiklerde kesme mekanizmasının kesme aşınma bölgesinde taneler ve taneleri bağlayan malzemenin eş zamanlı olarak kesilmeleri; deformasyon aşınması bölgesinde ise taneler arasındaki bağın yıkama ile ortadan kalkması sonucunda gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Zeng ve Kim (1992, 1996) polikristalin seramiklerde aşınma mekanizmasının aşındırıcı taneciklerin malzeme yüzeyinde çarptıkları bölgede plastik-akma bu yüzeyin alt/iç kısımlarında ise taneciklerin darbe etkisinin oluşturduğu stres dalgalarının neden olduğu taneler arası çatlak oluşumu mekanizması ile geliştiğini belirlemişlerdir. Alüminyum ve çelik örneklerle gerçekleştirdikleri deneylerde Ramulu vd., (2000) hem sünek hem de kırılabilir malzemelerde başlangıç deformasyon bölgesinin altında aşınma mekanizmasının derinlikle birlikte değişmediğini belirlemişlerdir. Az sayıda araştırmacı aşındırıcı tane boyu dağılımı ve aşındırıcı tanelerinin şekil özellikleri konularında çalışmıştır (Hashish, 1995; Momber ve Kovacevic, 2000, Fowler vd, 2009). Momber ve Kovacevic (2000) iki farklı tane boyutunda ve sabit aşındırıcı besleme miktarlarıyla, garnet kullanarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında aşındırıcı boyutunun artması ile kesme derinliği değişiminde ciddi oranda bir artış (8%) elde edememişlerdir. Ancak yüzey pürüzlülüğünün (kesme aşınma bölgesinde) artan aşındırıcı boyutuna bağlı

olarak arttığını belirlemişlerdir. Ojmertz (1993), düşük kesme hızlarında artan aşındırıcı besleme miktarı ile daha pürüzsüz yüzeyler elde edilebileceğini belirlemiştir. Benzer şekilde kesme yüzey kalitesini etkileyen parametrelerin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada (Külekçi ve Akkurt, 2001), düşük çalışma basınçlarında malzeme yüzey kalitesinin iyileştiği, aşındırıcı boyutu artışının yüzey kalitesini kötüleştirdiği ve kesme hızı artışının da malzeme yüzey pürüzlülüğüne olumsuz yönde etkide bulunduğu sonuçları elde edilmiştir. İki farklı çalışma basıncında yapılan bir çalışmada, kesme süresinde toplanan aşınan parçacıklar ortalama tane boyutu ve tane boyut dağılımı temelinde analiz edilmiştir. Çalışma basıncının ortalama tane boyutu ve dağılımına önemli ölçüde etki ettiği belirlenmiştir. (Momber ve Kovaçeviç, 1996).

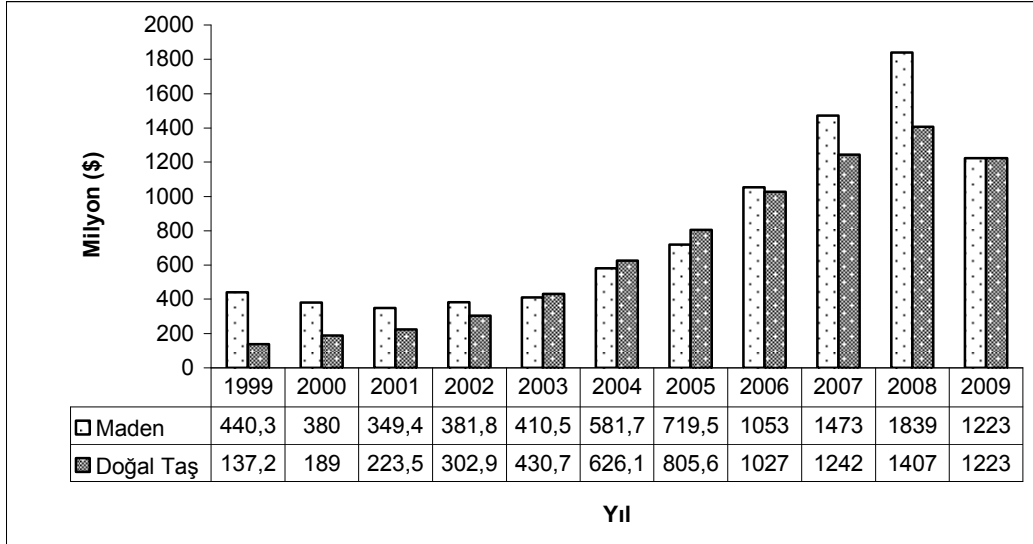
1.9. Tez Çalışmasının Amacı ve Kapsamı

Literatür özetinden de anlaşılacağı üzere, su jeti teknolojisinin kayaların kesiminde kullanılabilirliğini araştıran çalışmalar başlıca kesme mekanizmasının açıklanması ve optimum kesme parametrelerinin belirlenmesi üzerinde durmuşlardır. Bazı araştırmacılar, kayaç fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkisini araştırmaya yönelik çalışmalar yapmış olsalar dahi, kayaç dokusal özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkisini araştıran kapsamlı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada aşındırıcı su jeti kayaç kesmede hem parametrik değişimlerin hem de kayaç dokusal özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkilerinin tanımlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, kayaç dokusal özelliklerini en iyi yansıtan granit örnekler çalışmada kullanılmıştır. Çalışma malzemesi olarak granit seçilmesinin diğer nedenleri ise aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- i. Heterojen yapıda malzemeler olarak tanımlanabilecek olan granitlerin dış etkilere karşı mekanik davranışları, kayaç yapısındaki farklı mineralin kontrolündendir. Granitlerin yapısında dört temel mineral grubunu bulunur. Bunlar alkali feldspat, kuvars, plajiyoklaz ve biyotit'tir. Bunlara ek olarak bazı granitlerde opak mineraller, zirkon, muskovit, apatit gibi ikincil mineraller de bulunabilir. Granit yapısında yer alan minerallerin kimyasal bileşimleri, tane geometrileri ve fiziko-mekanik özellikleri farklılıklar gösterir. Ayrıca taneler arası çekim kuvvetleri de granit bileşimine bağlı olarak farklılık gösterir. Aşındırma temelli bir deformasyon süreci olan aşındırıcı su jeti kesme yönteminde kesme su+aşındırıcı karışımının basınç altında malzemedan

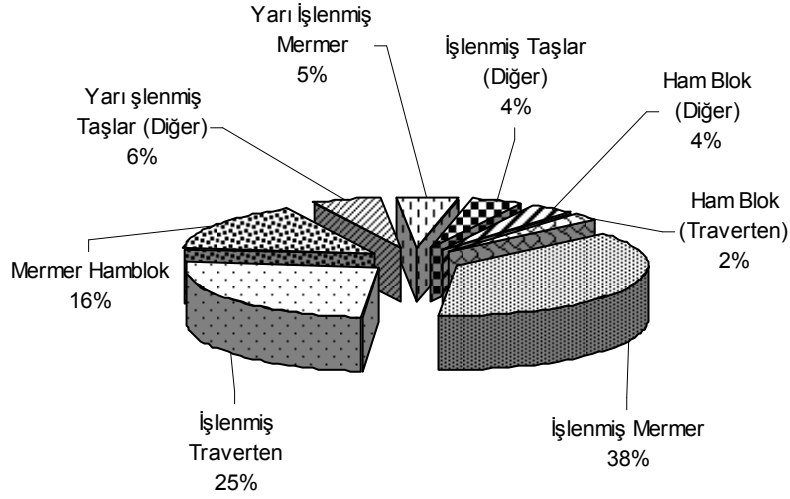
kırıntılar koparması şeklinde meydana gelir. Aşındırıcının etkisi genel olarak kinetik enerjisinin bir fonksiyonu olarak kabul edilir. Granit gibi taneli malzemelerde aşındırıcı+su karışımının aşındırma etkisinin malzeme yüzeyindeki temas noktasının özellikleri ile ilişkisi vardır. Bu nedenle bu noktadaki malzeme özelliklerinin tanımlanması gerekir. Granit için bu noktadaki malzeme özellikleri başlıca; tane iriliği, tanelerin mikro sertliği, tanelerin yerleşim şekli ve taneler birbiri ile ilişkileri üzerinden tanımlanabilir.

- ii. Türkiye, doğal taş üretimi ve rezervi ile dünyada zengin ülkeler arasındadır ve doğal taş ihracatı giderek artan bir ülkedir (Şekil 1.17). Doğal taş ihracatının önemli bir kısmını işlenmiş doğal taşların (Şekil 1.18) oluşturduğu ülkemizde, doğal taşın ocaktan çıkarılması, kesilmesi ve işlenmesinde geleneksel kesme yöntemleri ile yüksek aşınma ve buna bağlı olarak yüksek maliyetler oluşur. Uygulama alanlarından biri olan doğal taş kesme ve işlemede aşındırıcı su jeti kesme sistemlerinin kullanımını yaygınlaştırmak, geleneksel kesme sistemlerindeki maliyetin yüksek olması gibi dezavantajları gidermeye yönelik bir seçenek olarak önemli bir teknolojik katkı olacaktır. Böylelikle doğal taş işletim maliyetlerinin düşmesine yol açacak yöntem, ülke ekonomisine önemli katkıda bulunacaktır.



Şekil 1.17. Türkiye doğal taş ve maden ihracatının yıllara göre dağılımı (İMMİB, 2009)

Sonuç olarak; bu çalışma, aşındırıcı su jeti ile kesme/işleme yönteminin kısıtlı bir kullanım olanağı bulunduğu doğal taş kesme/işleme süreçlerinde, kesme süreçlerini kontrol eden faktörlerin açıklanmasını içeren bir çalışma olacaktır. Ek olarak, yöntemin kayalık delme işlemlerinde de ekonomik olarak kullanılma olanağının geliştirilmesi yönünde bir katkı sağlanmış olacaktır.



Şekil 1.18. Türkiye doğal taş ihracatının ürün gruplarına göre dağılımı (İMMİB, 2009)

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

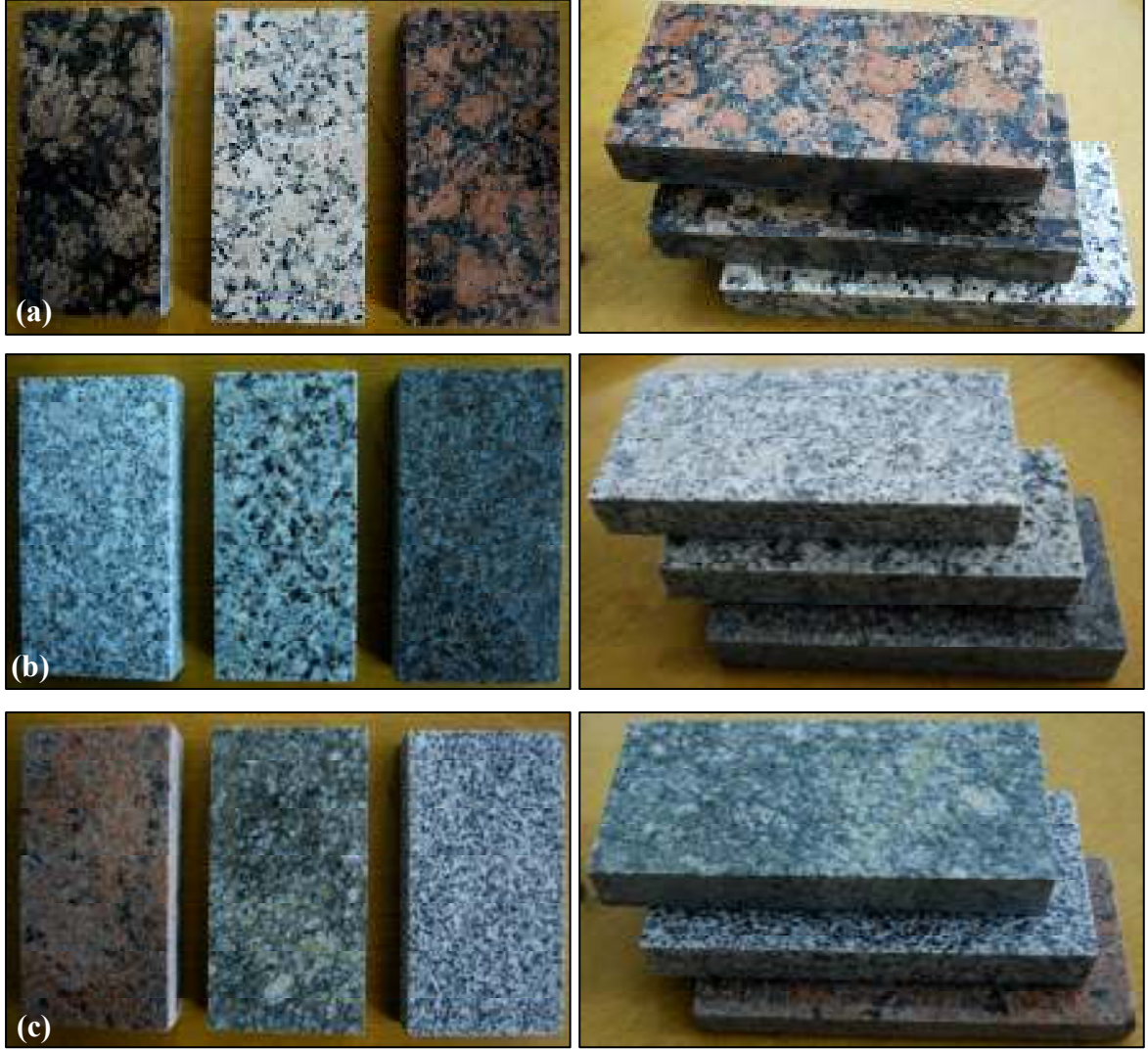
2.1. Deney Malzemesi ve Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda kullanılan kayalar uluslararası doğal taş piyasasında yaygın kabul görmüş granitler içerisinde seçilmiştir. Fiziksel incelemelerle alternatif kayalar içerisinde seçilen örnekler ve bu örnekler için temel fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 2.1’de verilmiştir. Kayalara ait ince kesit analizleri ile her kayanın tane boyut aralığı mikroskop altında belirlenmiştir. Sonraki aşamada DeWinter Material Plus v 4.1 yazılımı kullanılarak bu kayaların her birine ait tane boyut dağılımı belirlenmiştir. Görüntü analiz yazılımları, yaygın olarak biyolojik analizler ve malzeme özelliklerini araştıran mikro analizler için geliştirilmiş olduklarından kayalar için analizinde bazı güçlükler yaşanmaktadır. Sistem, tane boyut analizi için tane sınırlarını tespit etmek zorundadır. Bu, belli bir bölgede gruplanmış tanelerin analiz edilen resmin kalitesi ya da tanelerin iç çatlakları gibi sebeplerle tek bir tane gibi değerlendirilmesine ve olduğundan daha iri/ince tanelerin tanımlanmasına da neden olabilmektedir. Bu durumda, görüntünün değiştirilmesi ya da iyileştirilmesi veya iri tanelerin analiz sonucunda orijinal görüntü ile karşılaştırılarak analizden eline edilmesi gereklidir. Granit örneklerin analizinde, sıra dışı iri tanelerin gözlemlendiği durumlarda görüntü değiştirilmiş ve dar bir alanda gözlenen iri taneler ise analizden eline edilmiştir. Yazılım, her analiz için bir rapor sayfasını otomatik olarak oluşturmaktadır. Analiz sonucunda elde edilen tane boyut dağılımı değerleri Tablo 2.2’de verilmektedir. Seçilen örneklerin ortalama tane boyutları, Tablo 2.2’de verilen tane boyut dağılımlarının ortalaması ile bu boyutların dağılım oranlarının çarpımı sonucu elde edilmiştir. Granit gibi magmatik kökenli kayaların tane boyutları temelinde sınıflandırıldığı evrensel kabul görmüş bir sınıflama mevcut değildir. Bu nedenle, gerek ince kesit analizleri gerekse de görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılan tane boyut dağılımı analizleri ışığında, çalışılacak örnek grupları aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur.

- i. İnce taneli: < 5 mm
- ii. Orta taneli: 6 -10 mm
- iii. İri taneli: 10–20 mm

Analizler sonucunda seçilen 9 adet kayalar, Trabzon ve İstanbul’da faaliyet gösteren iki firmadan deneysel çalışmalarda kullanılacak şekilde boyutlandırılmış olarak (20 cm uzunluk, 10 cm genişlik ve 3 cm kalınlık) temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda

kullanılan örneklerle ait görüntü Şekil 2.1’de verilmiştir. Seçilen kayaçların mineralojik bileşimleri, modal mineralojik analiz yöntemi ile belirlenmiştir ve örneklerle ait mineralojik bileşimler Tablo 2.3’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan örneklerle ait görüntüler a) iri taneli kayaçlar, b) orta taneli kayaçlar, c) ince taneli kayaçlar

Deneylerde kullanılan kayaçların kalitatif XRD faz analizleri K.T.Ü. Fizik Bölümü laboratuvarlarında mevcut Rigaku XRD cihazı kullanılarak belirlenmiştir. XRD çekimleri $3-70^{\circ} 2\theta$ açıları ve $0,5^{\circ}$ gonyometre hızında gerçekleştirilmiştir. Kayaçlara ait XRD toz kırınım desenleri Ek Şekil 1-9.’da verilmektedir.

Tablo 2.1. Seçilen örneklerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri






Özellik	Carmen Red	Baltic Brown	Rosa Minho
Su emme oranı (%)	0,24	0,28	0,30
Birim hacim ağırlık (KN/m ³)	26,4	26,8	27,2
Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	105	94	110
Eğilme dayanımı (MPa)	13	12,7	15,3
Mikrosertlik (Vickers)	516	505,6	530,3
Ortalama tane boyutu (mm)	15,1	11,97	13,16
	Aksaray Yaylak	Giresun Vizon	Azul Platino
Su emme oranı (%)	0,21	0,22	0,2
Birim hacim ağırlık (KN/m ³)	26,2	26,7	26,1
Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	112	98	115
Eğilme dayanımı (MPa)	7,6	18,5	14,5
Mikrosertlik (Vickers)	545	540	535
Ortalama tane boyutu (mm)	6,36	7,97	6,89
	Multicolor Red	Bergama Grey	Balaban Green
Su emme oranı (%)	0,17	0,19	0,19
Birim hacim ağırlık (KN/m ³)	25,9	26	26,6
Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	138,5	145	145
Eğilme dayanımı (MPa)	18,4	14,4	15,2
Mikrosertlik (HV)	556	544,8	570,8
Ortalama tane boyutu (mm)	2,33	2,8	2,88

15x15 mm boyutlarında hazırlanmış ve parlatılmış granit örneklerinin mikrosertlikleri, Shimadzu marka Vickers mikrosertlik ölçer cihazı ile ölçülmüştür. Mikrosertlik ölçüm cihazı ile mineral mikrosertliği ölçümü (Delgado vd. (2005) ve Xie ve Tamaki (2007)'nin önerdiği şekilde) yapılırken, mineral üzerinde ortalama 3–5 farklı noktaya 10'ar sn, 100 gr yükleme yapılmıştır. Her bir noktada elde edilen değerlerden en yüksek ve en düşük mikrosertlik değerleri belirlenmiştir. Minerale ait nihai mikrosertlik değeri, bu iki değer aritmetik ortalaması olarak hesaplanmıştır. Kayaç örneğine ait mikrosertlik değeri ise mineral ya da minerallerin granit içinde bulunma oranları (yüzdesi) ile mikrosertlik değerlerinin çarpımı sonucu elde edilen değerlerin toplamı olarak belirlenmiştir.




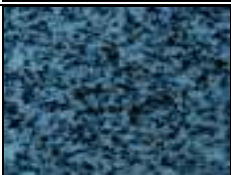
Tablo 2.2. Granit örneklerin görüntü analiz yazılımı ile elde edilen tane boyut dağılımları

Multicolor Red			Azul Platino			Carmen Red		
Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran
0-1	216	50,704	0-1	151	88,304	0-5	13	5,991
2-3	81	19,014	2-3	11	6,433	6-10	64	29,493
4-5	78	18,310	4-5	5	2,924	11-15	48	22,120
5-8	51	11,972	6-10	4	2,339	16-20	42	19,355
						21-30	53	24,424
Bergama Grey			Aksaray Yaylak			Baltic Brown		
Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran
0-3	160	66,667	0-3	32	51,610	0-5	50	27,322
3-5	43	17,917	3-5	21	33,870	6-10	61	33,333
5-8	29	12,083	6-9	7	11,290	11-15	69	37,705
8-10	8	3,333	9-15	2	3,230	16.20	17	9,290
						20-30	15	8,197
Balaban Green			Giresun Vizon			Rosa Minho		
Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran	Boyut Aralığı	Sayılan	Oran
0-1	123	31,458	0-5	72	83,72	0-5	16	11,852
2-3	134	34,271	5-10	11	12,790	6-10	37	27,407
4-5	92	23,529	10-15	2	2,330	10-15	35	25,926
5-10	42	10,742	15-20	1	1,160	16-20	26	19,259
						21-30	21	15,556

Tablo 2.3. Deneyleerde kullanılan örnekleerin mineralojik analiz sonuçları

Kayaç Adı	Mineralojik Bileşim (%)	Açıklama	
	Alkali Feldspat	47	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup, ana bileşen olarak başlıca alkali feldspat, kuvars, plajiyoklaz, biyotit minerallerinden; ayrıca eser miktarda muskovit mineralleri ile tali mineral olarak zirkon ve opak minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,2-30 mm aralığındadır.
	Kuvars	37	
	Plajiyoklaz	10	
	Biyotit	5	
	Diğer	1	
	Alkali Feldspat	57	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup, ana bileşen olarak başlıca; alkali feldspat, kuvars, plajiyoklaz, amfibol, biyotit, eser miktarda da tali mineral olarak zirkon, apatit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,6-30 mm aralığındadır.
	Kuvars	21	
	Plajiyoklaz	15	
	Amfibol	3	
	Biyotit	3	
	Alkali Feldspat	54	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup ana bileşen olarak başlıca; alkali feldspat, kuvars, plajiyoklaz, amfibol, biyotit, eser miktarlarda da tali mineral olarak zirkon, apatit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,2-22 mm aralığındadır.
	Kuvars	29	
	Plajiyoklaz	10	
	Biyotit	5	
	Diğer	2	
	Alkali Feldspat	57	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup ana bileşen olarak başlıca; alkali feldspat, kuvars, plajiyoklaz, amfibol, biyotit ve ser miktarda, tali mineral olarak zirkon, apatit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,2-7,4 mm aralığındadır.
	Kuvars	25	
	Plajiyoklaz	10	
	Biyotit	6	
	Diğer	2	
	Alkali Feldspat	52	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup ana bileşen olarak başlıca; alkali feldspat, kuvars, amfibol grubu mineraller, biyotit ile eser miktarda piroksen minerallerinden , tali mineral olarak da zirkon mineralleri, opak mineraller, apatit ve titanit minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,5-8 mm aralığındadır.
	Plajiyoklaz	24	
	Kuvars	14	
	Biyotit	4	
	Amfibol	3	

Tablo 2.3.'ün Devamı

Kayaç Adı	Mineralojik Bileşim (%)	Açıklama	
	Plajiyoklaz	40	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup, ana bileşen olarak başlıca; alkali feldispat, kuvars, plajiyoklaz, biyotit ve amfibol minerallerinden, eser miktarda da tali mineral olarak da titanit, zirkon mineralleri ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,4-6,4 mm aralığındadır.
	Alkali Feldspat	26	
	Kuvars	22	
	Biyotit	7	
	Amfibol	2	
	Alkali Feldspat	51	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu olup, ana bileşen olarak başlıca; alkali feldispat, kuvars, plajiyoklaz, biyotit minerallerinden, eser miktarda da muskovit mineralleri ile tali mineral olarak da zirkon ve opak minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,4-6,5 mm aralığındadır.
	Kuvars	36	
	Plajiyoklaz	5	
	Biyotit	6	
	Diğer	2	
	Plajiyoklaz	53	Kayaç hipidiyomorf-tanesel dokulu olup, ana mineral olarak başlıca; feldispat, kuvars, amfibol, biyotit, eser miktarda da tali mineral olarak titanit ve opak minerallerden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,2-6 mm aralığındadır.
	Alkali Feldspat	17	
	Kuvars	16	
	Biyotit	7	
	Amfibol	5	
	Diğer	2	
	Alkali Feldspat	52	Kayaç allotriyomorf-tanesel dokulu ana bileşen olarak başlıca; alkali feldispat, kuvars, plajiyoklaz, biyotit minerallerinden, eser miktarda da muskovit mineralleri ile tali mineral olarak zirkon ve opak minerallerinden oluşmaktadır. Kayaç içerisindeki mineral tane boyutları 0,2-2 mm aralığındadır.
	Kuvars	23	
	Plajiyoklaz	13	
	Biyotit	8	
	Diğer	4	

2.2. Deney Tasarımı ve Düzenegi

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 çıkaracaktır (Savaşkan vd., 2004; Kasman, 2009; Canıyılmaz ve Kutay, 2003). Bu nedenle, çalışma kapsamında klasik full faktöriyel tasarımlarda yapılan sadece 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). Yöntem pek çok optimizasyon problemlerinin çözümünde başarılı olarak ortaya çıkmaktadır. Çözümün sadece en az sayıda deneyle elde edilmesini sağlamakla kalmaz, kontrol edilemeyen faktörlere karşı minimum hassasiyeti göstermesi, gerekli toleransların en düşük maliyetle elde edilmesini sağlar. Deney faktörleri (kesme parametreleri) literatüre uygun olarak kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi, çalışma basıncı ve aşındırıcı boyutu seçilmiştir. Aşındırıcı boyutu etkisi boyut teminindeki güçlükler nedeniyle iki farklı değer için araştırılmıştır. Deney faktörleri ve seviyeleri Tablo 2.4'de verilmiştir. Tez kapsamında gerçekleştirilecek deneyler Tablo 2.4'de verilen değişkenler ve test edilmesi düşünülen değerler için tam faktöriyel deney tasarımı kullanılarak gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı sadece bir örnek için 128'dir. Üç farklı boyut aralığı ve her grupta üç örnek için gerçekleştirilecek deney sayısı ise 1152 olacaktır. Bu nedenle Tablo 2.4'de verilen parametre ve seviyelere uygun deney tasarımı için Taguchi'nin Ortogonal Dizin Serilerinden yararlanılmıştır.

Tablo 2.4. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktör	Sembol	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye	4. Seviye
Kesme Hızı (mm/dk)	T	100	150	200	250
Aşındırıcı Besleme Miktarı (gr/dk)	M	150	200	250	300
Meme-Örnek Mesafesi (mm)	D	2	4	6	8
Çalışma (Pompa) Basıncı (MPa)	P	200	250	300	350
Aşındırıcı Boyutu (mesh)	S	80	120	-	-

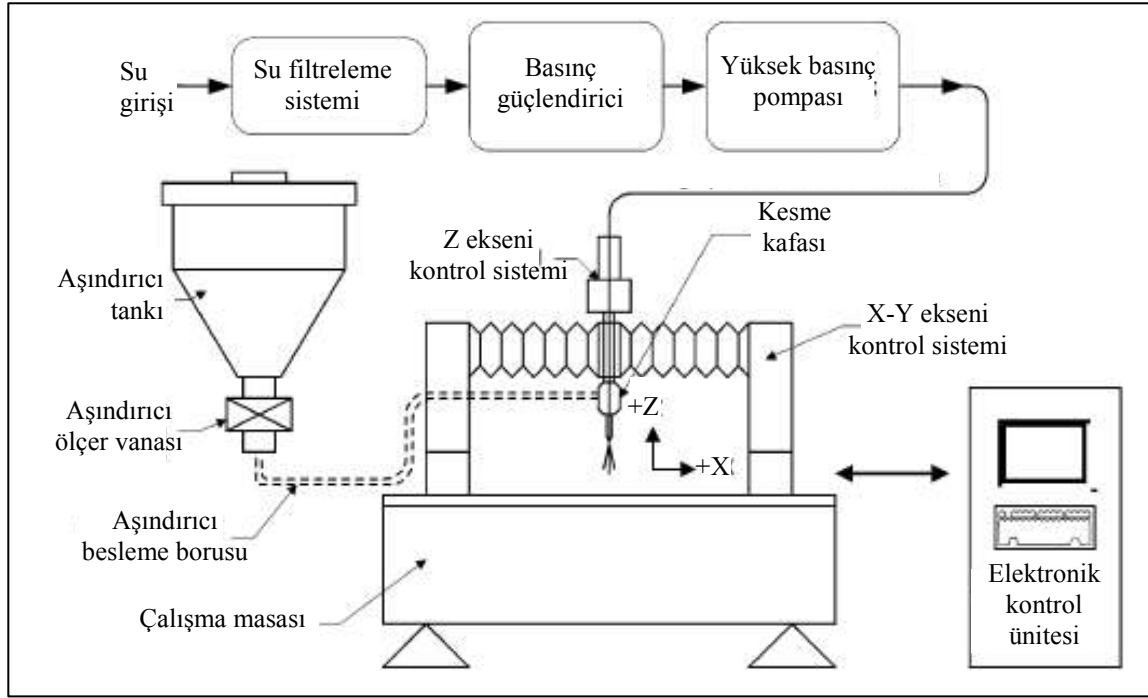
$L_A(B)^C$ şeklinde tanımlanan standart ortogonal dizinlerde; ortogonal dizin Latin kareden üretildiği için L Latin kareyi, A yapılması gereken deney sayısını veya deneylerde kullanılan faktörlerin kombinasyonunu, B her kolondaki seviyelerin sayısını, C ise ortogonal dizindeki kolonların sayısını gösterir. $L_A(B)^C$ ifadesi deneyde kullanılan faktörlerin aynı seviyede olduğu durum için geçerlidir. Faktörlerin aynı seviyede olmadığı deney tasarımlarında ise benzer durum söz konusudur. $L_A[B^C * D^E]$ ifadesinde B ve D seviye sayısını gösterirken C ve E kolon ya da faktör sayısını göstermektedir. Deney faktörleri ve seviyeleri dikkate alındığında, Taguchi deney tasarım tekniğinin öngördüğü standart ortogonal dizinlerden $L_{16}(4^4 * 2^1)$ dizinin deney tasarımı olarak seçilmesi planlanmıştır. $L_{16}(4^4 * 2^1)$ ortogonal dizinine göre tasarlanmış deneyin faktör ve seviyeleri Tablo 2.5’de verilmiştir.

Tablo 2.5. $L_{16}[4^4 * 2^1]$ ortogonal dizinine göre tasarlanmış deneyin faktör ve seviyeleri

Deney No:	Faktör sayısı				
	Kesme hızı (mm/dk)	Aşındırıcı besleme miktarı (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

DeneySEL çalışmalarında, üç eksenle hareket yeteneğine sahip ve bilgisayar kontrollü bir su jeti makinesi kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 2.1’de, ayrıca su jeti makinesine ait özellikler de Tablo 2.6’da verilmiştir. Kesme deneyleri

İstanbul'da özel bir firmada gerçekleştirilmiştir. 3 cm kalınlık, 10 cm genişlik ve 20 cm uzunluğundaki granit örnekler, uzunlukları boyunca Tablo 2.5'deki her bir deney koşulunda, dört eşit şekilde aşındırıcı su jeti ile kesilmiştir.



Şekil 2.2. Deneyel çalışmaların gerçekleştirildiği deney düzeneğinin şematik görünümü (Duflou ve arkadaşları, 2001'den değiştirilerek).

Tablo 2.6. Deneyel çalışmalarda kullanılan su jeti makinesine ait özellikler

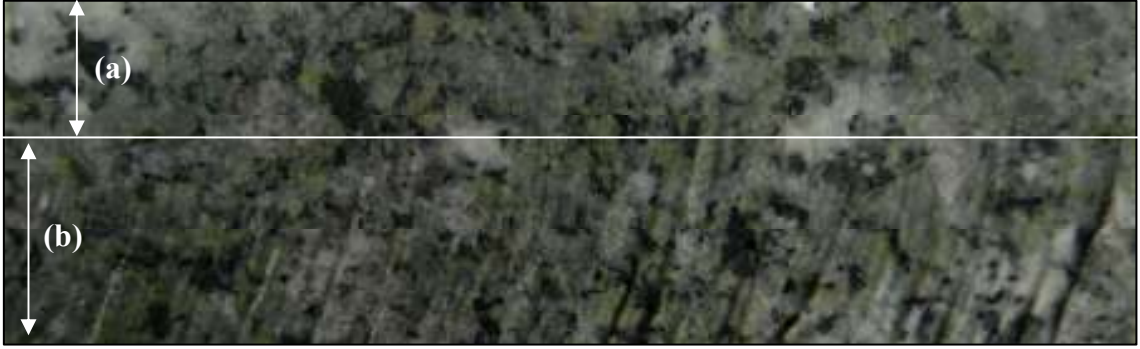
Makine tipi	SL-V 50 HP (KMT)
Enerji tüketimi (kwh)	40
Aşındırıcı tüketimi (gr/dk)	100-400
Meme çapı (mm)	1,1
Meme Uzunluğu (mm)	75
Su tüketimi (lt/dk)	3,8

2.3. Kesme Sonrası Granit Örneklerin Kesme Geometrilerinin Analizi

Taguchi deney tasarımında sonuçların değerlendirilmesi parametrik değişimlerin analizi ve değişime katkı analizi olmak üzere iki yöntemle gerçekleştirilebilir. Değişime katkı analizinde yaygın olarak varyans analizi (ANOVA) kullanılır. Deney faktörlerinin kesme performansı üzerindeki etkisi ANOVA yöntemi ile MINITAB yazılımı kullanılarak

analiz edilmiştir. Varyans analizlerinde, F oranı performans göstergeleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip deney faktörlerini belirlemek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlardan hesaplanan F oranı, standart istatistiksel tablolardaki F kritik oranı ile karşılaştırılır. Eğer deney sonuçlarından elde edilen F oranı F kritik oranından büyükse, ($F_{\text{hesaplanan}} > F_{\text{kritik}}$) bu durumda deney faktörü istatistiksel olarak kesme performans göstergesi ve/veya göstergeleri üzerinden anlamlı etkiye sahiptir. Aksi durumda, deney faktörü istatistiksel olarak anlamsız etkiye sahiptir. Ayrıca, deney sonuçlarından elde edilen F oranı ($F_{\text{hesaplanan}}$) ne kadar büyükse, ait olduğu deney faktörünün deney sonucu üzerinde o derece büyük etkisi vardır (Azmir ve Ahsan, 2008).

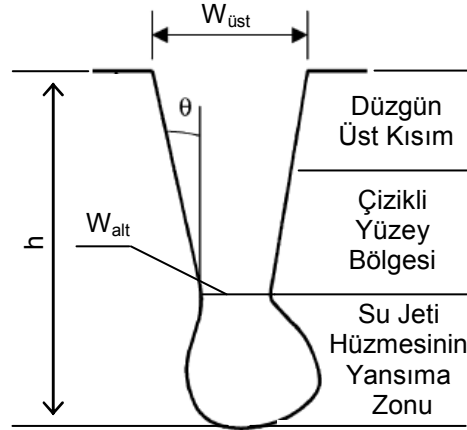
Kesilen örnekler üzerinden gruplara ayrılmış kayaçlar için kesme performans göstergeleri olarak, a) kesme derinliği, b) kesme-aşınma bölgesi derinliği (Şekil 2.3’de gösterilen şekilde) c) kesme genişliği, d) kerf açısı ve e) pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.



Şekil 2.3. Kesme sonrası elde edilen yüzey görüntüsü, a) kesme aşınma bölgesi derinliği, b) deformasyon aşınma bölgesi derinliği, a+b) kesme derinliği

Kerf açısı için yarık girişinden başlayarak yarık tabanına doğru kavisliliğin bitiş noktasına kadar 4 farklı seviyeden kumpas ölçümleri ile yarık genişlikleri ölçülmüştür (Şekil 2.4). Elde edilen ölçümler, Wang ve Guo (2003) tarafından önerilen (1) bağıntısında kullanılarak örnek kerf açıları ölçülmüştür. Diğer ölçümler ise her dilimden 4'er adet değer okuyup ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

Örnek kesim yüzeylerindeki pürüzlülük ölçümleri, daha düzgün olan kesme aşınma bölgesinden (Şekil 2.5), Mitutoyo SJ-301 SurfTest pürüzlülük ölçer cihazı (Şekil 2.6) kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 2.4. Kerf açısı oluşumu şematik gösterimi (Wang ve Guo, 2003)

$$\text{Kerf açısı} = \theta = \tan^{-1} \left(\frac{W_{üst} - W_{alt}}{h} \right) \quad (2.1)$$

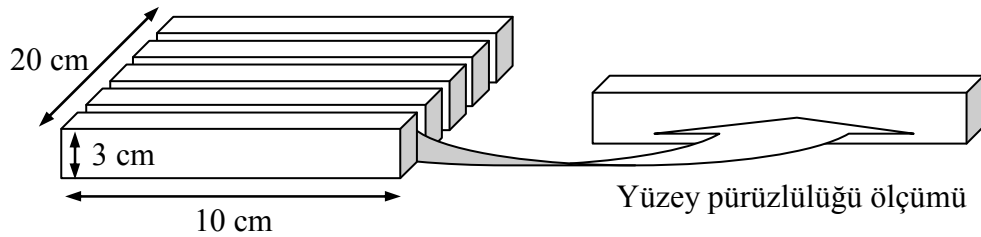
Burada;

$W_{üst}$ = Üst yarığın genişliği

W_{alt} = Alt yarığın genişliği

h = Kesme derinliği

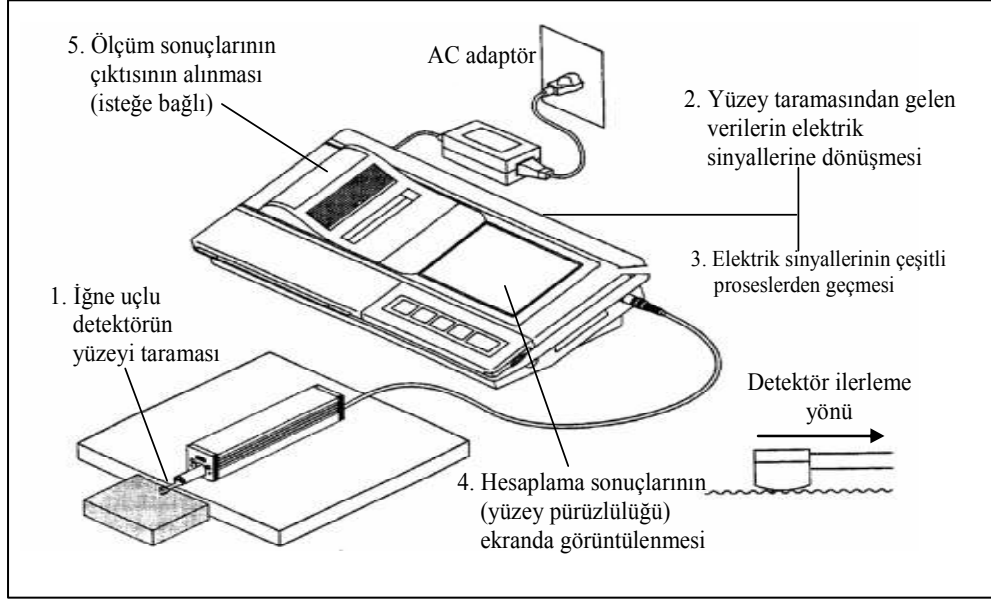
θ = Kerf açısı



Şekil 2.5. Kesme işlemi sonrası granit örnekler ve örnek yüzey pürüzlülük ölçümleri.

Su jeti hızmasının 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. Bu nedenle, yüzeye temas ilkesine göre çalışan SJ-301 Surfrest iğne tipli pürüzlülük ölçer ile örnek

kesim yüzeyleri boyunca ölçüm alınamamaktadır. Tüm örneklerde belirli bir hat belirlenerek (kesme aşınma bölgesi) yüzey pürüzlülük değerleri bu hat üzerinde alınmıştır. Yüzey pürüzlülük değeri olarak, orta hattan profile olan uzaklık değerlerinin aritmetik ortalamasını ifade eden ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) esas alınmıştır.



Şekil 2.6. SJ-301 Surf test iğne uçlu pürüzlülük ölçerin şematik görünümü ve çalışma ilkesi.

3. BULGULAR VE İRDELEME

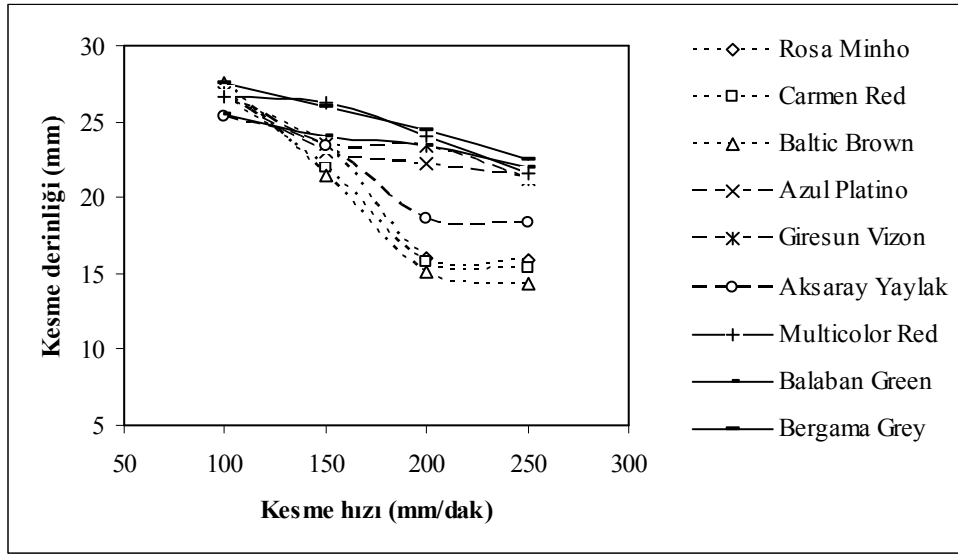
3.1. Parametrik Değişimlerin Kesme Performansı Üzerindeki Etkisi

Deney faktörlerinin veya parametrik değişimlerin kesme performanslarına etkileri, takip eden kısımdaki şekillerde sunulmuştur (Şekil 3.1-3.25). Belirtilen bölümlerde sunulan şekiller, Taguchi deney tasarım yönteminin öngördüğü ortalamaların ortalaması (mean of means) ilkesi esas alınarak çizilmiştir. Ek olarak Varyans analizleri ile de proses üzerinde istatistiksel olarak etkili olan parametrik değişimler, bir başka deyişle kontrol faktörleri tespit edilmiştir.

3.1.1. Kesme Derinliği

3.1.1.1. Kesme Hızı Değişimi

Genel bir ifadeyle kesme hızı, malzemenin su jetinin aşındırma/kesme etkisine maruz kaldığı süre olarak ifade edilebilir. Bir başka deyişle; yüksek kesme hızı, malzeme üzerindeki bir noktanın daha az süre ile su jeti etkisinde kalması anlamına gelir. Bunun bir sonucu olarak da düşük kesme derinlikleri elde edilir. Kesme hızının artışı, aşındırıcı su jetinin kesme performansına başlıca etkisi malzeme yüzeyine temas edecek aşındırıcı tanecik sayısı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Hızın artmasıyla, malzeme yüzeyine az sayıda aşındırıcı taneciği temas edecektir. Böylelikle, kesilen malzemeden uzaklaşan parçacık miktarı azalacaktır. Bu da kesme hızındaki artış ile düşük kesme derinliklerinin elde edilmesine sebep olur. Şekil 3.1'deki değişim incelendiğinde; kesme hızının artışı, çalışılan tüm kayaçların kesme derinliklerinin beklenildiği gibi düşmesine neden olmuştur. Şekil'den de görüleceği üzere kesme hızı artışı ile ortaya çıkan kayaç kesme derinliği değerleri yukarıda bahsedilen genel davranışı yansıtmaktadır. Ayrıca, kesme derinliği olarak ölçülen mesafenin bir kısmı jet/aşındırıcı karışımının ve/veya aşındırıcı taneciklerin düşey doğrusal hareketinin sonucu değildir. Özellikle düşük kesme hızında, yarık dibindeki su aşındırıcı karışımı üzerine gelen yeni karışımla birlikte oluşturduğu girdap hem yarık derinliğini hem de yarık genişliğini arttıracak şekilde aşındırma yapar. Kesme hızının yüksek olduğu durumda delik tabanında bu tür bir aşındırma süreci gelişmez.

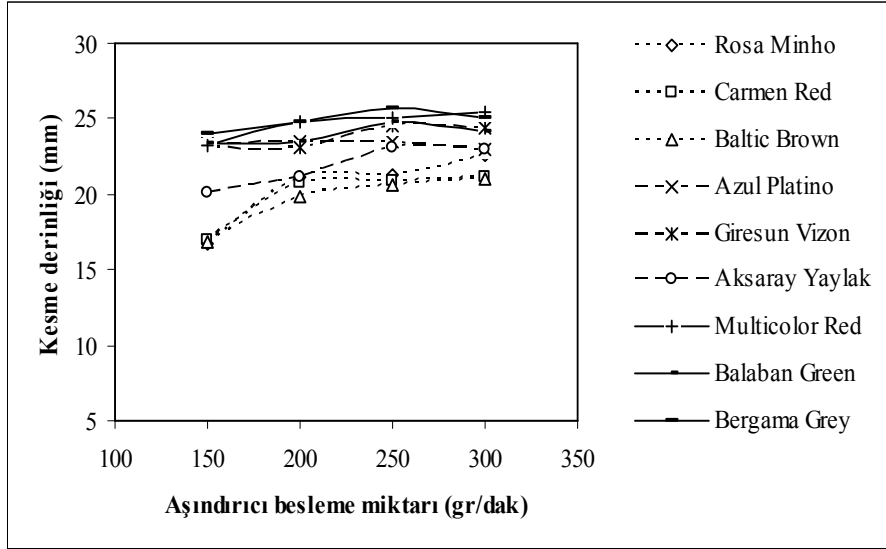


Şekil 3.1. Örnek kesme derinliklerinin kesme hızına bağlı değişimi

3.1.1.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Aşındırıcı miktarındaki artış, tüm kayalarda kesme derinliklerinin artmasına neden olmasına rağmen değişim dar bir aralıkta gerçekleşmiştir (Şekil 3.2). Aşındırıcı su jeti ile kesme, su-aşındırıcı karışımının malzemeden erozyonla parçacık uzaklaştırma olarak tarif edilir. Bu nedenle, aşındırma etkisi üzerinde en etkin faktörlerden birisi aşındırıcı miktardır. Bir başka ifadeyle, jet içerisine fazla miktarda aşındırıcı ilavesi kesilen malzemeden daha fazla parçacığın uzaklaşması anlamına gelir. Ancak, ilave edilecek aşındırıcı miktarı için kritik bir değer vardır ve bu değer kesme işleminden optimum performansın elde edilmesi için aşılmaması gerekir. Jet içerisinde aşındırıcı artışı, aşındırıcı taneciklerin birbirlerine çarparak ufalanmasına ve tane boyutunun düşmesine neden olabilir. Bu da, aşındırıcı taneciklerin tek-tek kesme yeteneğinin düşmesine sebep olur. Ayrıca, aşındırıcı ile su karışımını sağlayan karışım odası koşullarının uygun olmaması (uygun çap, uygun iç kaplama gibi) da aşındırıcı taneciklerin kesme anındaki performansını etkileyen ciddi bir problemdir. Artan aşındırıcı miktarı, aşındırıcı taneciklerinin birbirlerine sürtünmesi olanağını artırır ve her bir aşındırıcı taneciğinin enerjisinin düşmesine yola açar. Bir başka ifadeyle, sürtünme sonucu boyutu küçülen aşındırıcı taneciklerin kinetik enerjileri de malzemeden parça kopartma yeteneklerini zayıflatacak şekilde düşecektir. Wang ve Guo (2002) özellikle kesme derinliği açısından bakıldığında genel kesme performansının aşındırıcı miktarı artışı ile doğrusal artmadığını

belirtmişlerdir. Ayrıca, aşındırıcı miktarının artışı kesme performansını artırabildiği gibi özgül enerjinin düşmesine, bağlı olarak da kesme maliyetinin artmasına da sebep olabilmektedir (Xiaohong vd., 2002).

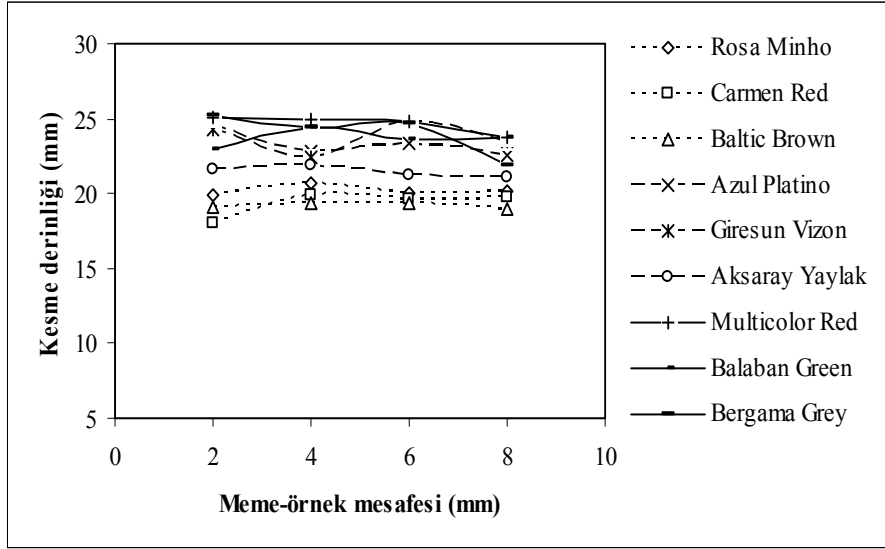


Şekil 3.2. Örnek kesme derinliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi

3.1.1.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi

Literatürde, farklı türden malzemelerle yapılan çalışmalarda, meme-örnek mesafesindeki artışın toplam kesme derinliği üzerinde belirgin bir etki göstermediğini ifade eden çok sayıda araştırmaya rastlamak mümkündür (Ramulu ve Arola, 1994; Chen vd., 1996a; Abdel-Rahman ve El-Domiaty, 1998). Çalışılan kayalarda elde edilen kesme derinlikleri incelendiğinde, meme-örnek mesafesi ile kesme derinliği değişiminin literatürde dikkat çekilen değişim karakteristiği ile benzerlik gösterdiği söylenebilir (Şekil 3.3). Bazı kayalarda oldukça kısıtlı bir seviyede de olsa meme-örnek mesafesinin artışı ile kesme derinliklerini arttığı söylenebilir. Oluşan durumun özellikle aşındırıcı su jetinin mekaniği ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yüksek meme-örnek mesafelerinde memeden çıkan jet, malzeme üzerine çapını genişleterek temas eder. Jet çapının artması, toplu halde etkin olan aşındırıcı taneciklerinin dağılarak kesmedeki etkinliğini kaybetmesine neden olur. Bu da, jet içerisindeki aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjilerini hızlı kaybetmesini, buna bağlı olarak da düşük kesme derinliklerinin elde edilmesine yol açabilir. Özetle, yüksek meme-örnek mesafelerinde jetin çapını genişleterek malzeme

üzerinde yayılması jetin kesmeye odaklandırılmaması ile sonuçlanır. Bunun sonucu olarak da düşük kesme derinliklerinin elde edilmesi söz konusu olacaktır.

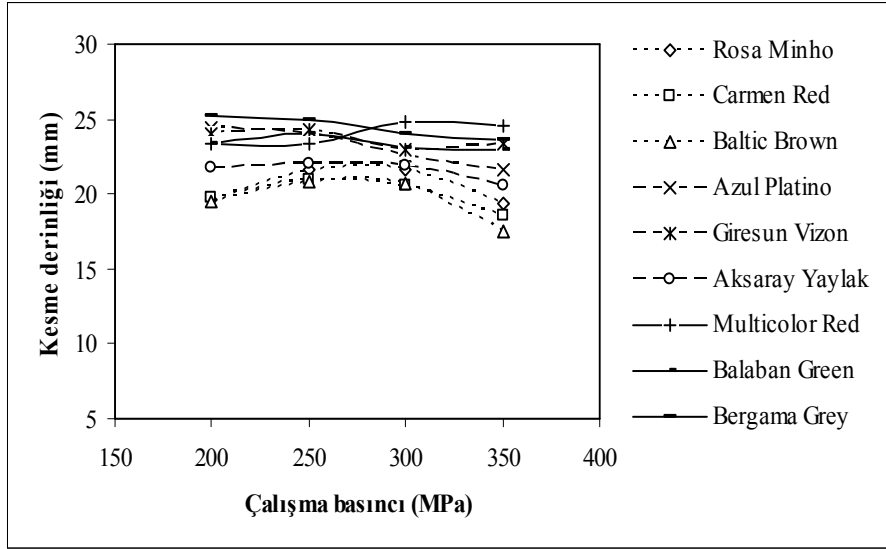


Şekil 3.3. Örnek kesme derinliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi

3.1.1.4. Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncı değişiminin kayaçların kesme derinliği üzerindeki etkisi, iki farklı şekilde gözlenmiştir (Şekil 3.4). İri ve orta taneli kayaçların kesme derinlikleri artan çalışma basıncı ile birlikte eşik bir değere kadar artmış, bu eşik değerden sonra örnek kesme derinliklerinde düşüş meydana gelmiştir. İnce taneli kayaçlarda ise çalışma basıncındaki artan değişim örnek kesme derinliklerinin artmasına yol açmıştır. Ancak bu artış kısıtlı bir seviyede kalmıştır. Literatürde çalışma basıncı artışı ile pek çok farklı malzemede yüksek kesme derinliklerinin elde edildiğini belirten çok sayıda çalışma mevcuttur (Hashish, 1984a; Wang ve Guo, 2002). Ancak; beklenenin aksine Momber ve Kovacevic (1997) ile Wang (1999) çalışma basıncı ile kesme derinliği arasındaki ilişkinin özellikle yüksek basınçlarda azalan yönde ve lineer olmayan bir değişim gösterdiğine işaret etmişlerdir. Araştırmacılar bu durumu, yüksek basınçlarda fazla sayıda aşındırıcı taneciğinin çarpışma gibi nedenlerle parçalanması ve kinetik enerjilerini kaybetmesine bağlamışlardır. Kinetik enerjilerini kaybeden aşındırıcı tanecikler, kesme güçleri/yeteneklerini de kaybedecekleri için böyle bir etkiyi ortaya çıkabileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca, araştırmacılar herhangi bir malzemenin kesilebileceği en düşük basınç

için bir sınır değerin var olduğunu vurgulamışlardır. Bu sınır basınç değerinin de malzeme basınç dayanımına bağlı olarak arttığı da ifade edilmiştir. Çalışılan örneklerin kesme derinlikleri incelendiğinde, literatürde işaret edilenler ile uyumluluk gösterdiği söylenebilir.

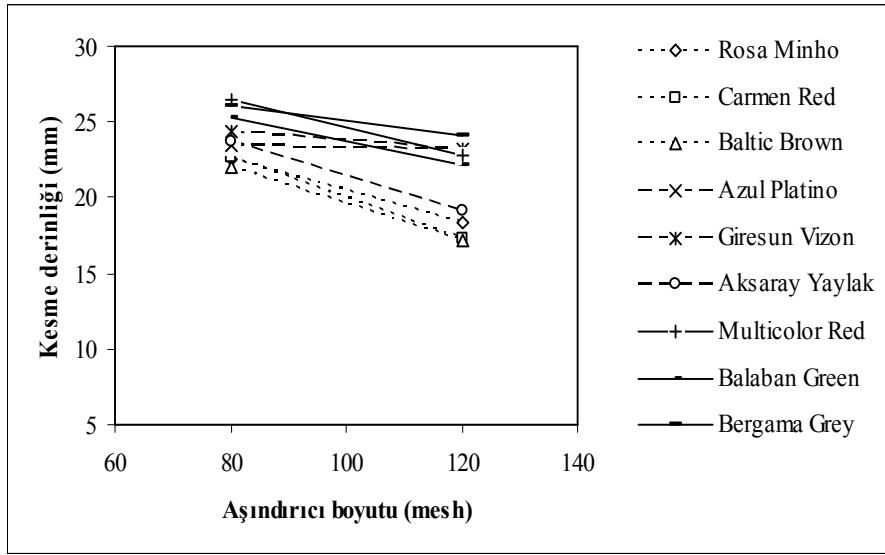


Şekil 3.4. Örnek kesme derinliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi

3.1.1.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi

Çalışılan kayaçların kesme derinlikleri incelendiğinde, aşındırıcı tane boyunun azalması ile kesme derinliğinin azaldığı görülmektedir (Şekil 3.5). Ancak, bazı kayaçlarda (Azul Platino ve Giresun Vizon) değişim diğer kayaçlara oranla daha düşük seviyelerde gerçekleşmiştir.

Aşındırıcı su jeti ile kesmede, aşındırıcı boyutunun kesme derinliği üzerindeki etkisi doğrudan aşındırıcı taneciğin ağırlığı ve bağlı olarak kinetik enerjisine bağlıdır (Zeng ve Kim, 1996). İri boyutlu aşındırıcı tanecikleri, ince taneciklere oranla göre daha ağırdırlar. Dolayısıyla sahip oldukları kinetik enerjileri daha yüksektir. Bu nedenle, iri boyutlu aşındırıcı kesme sürecinde kinetik enerjisini daha yavaş kaybedeceğinden yarık içinde daha derinlere kadar kesme yapabilir.



Şekil 3.5. Örnek kesme derinliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi

3.1.1.6. Varyans Analizi

ANOVA analizleri sonucunda, çalışma parametrelerinin örnek kesme derinlikleri üzerindeki istatistiksel etkisi belirlenerek sonuçlar Ek Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre; Baltic Brown ve Carmen Red için kesme derinliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri; kesme hızı ve aşındırıcı boyutu olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde Rosa Minho için kesme derinliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri; kesme hızı, aşındırıcı boyutu ve aşındırıcı besleme miktarı olarak belirlenmiştir. Baltic Brown’da anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin örnek kesme derinlikleri üzerindeki katkı oranları ise % 70,34 ile kesme hızı ve %14,99 ile aşındırıcı boyutudur. Carmen Red için bu oranlar sırasıyla % 64,95 ile kesme hızı ve % 21,28 ile aşındırıcı boyutu olarak bulunmuştur. Rosa Minho’da anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin örnek kesme derinlikleri üzerindeki katkı oranları da % 64,31 ile kesme hızı, % 13,73 ile aşındırıcı boyutu ve %14,85 ile aşındırıcı besleme miktarıdır.

Baltic Brown, Carmen Red, Rosa Minho’da çalışma parametrelerinin kesme derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Baltic Brown:

$$KD = 35,5 - 4,58 \times T + 1,31 \times M + 0,461 \times D - 0,622 \times P - 4,92 \times S, \quad R^2 = \% 87,1 \quad (3.1)$$

Carmen Red:

$$KD = 35,5 - 4,03xT + 1,28xM + 0,157xD - 0,403xP - 5,37xS, \quad R^2 = \% 87,7 \quad (3.2)$$

Rosa Minho:

$$KD = 32,0 - 3,93xT + 1,78xM + 0,310xD - 0,221xP - 4,29xS, \quad R^2 = \% 83,7 \quad (3.3)$$

Azul Platino için kesme derinliği üzerinde etkin olan çalışma parametreleri kesme hızı, meme-örnek mesafesi ve çalışma basıncıdır. Çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 74,56 ile kesme hızı, % 14,30 ile çalışma basıncı ve % 9,08 ile meme-örnek mesafesi olarak belirlenmiştir. Giresun Vizon için kesme derinliği üzerinde anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri kesme hızı, meme-örnek mesafesi ve çalışma basıncı olarak belirlenmiştir. Anlamlı parametrelerin katkı oranları ise % 76,55 ile kesme hızı, % 12,13 ile meme-örnek mesafesi ve % 9,51 ile çalışma basıncı şeklindedir. Benzer şekilde, Aksaray Yaylak için kesme derinliği üzerinde anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, çalışma basıncı ve aşındırıcı boyutudur. Aksaray Yaylak'ta etkin çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 56,46 ile kesme hızı, % 31,54 ile aşındırıcı boyutu, % 6,72 ile aşındırıcı besleme miktarı ve % 4,34 ile çalışma basıncı olarak hesaplanmıştır.

Azul Platino, Giresun Vizon ve Aksaray Yaylak'ta çalışma parametrelerinin kesme derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Azul Platino:

$$KD = 31,7 - 1,71xT - 0,12xM - 0,507xD - 0,775xP - 0,365xS, \quad R^2 = \% 82,1 \quad (3.4)$$

Giresun Vizon:

$$KD = 30,8 - 1,80xT - 0,02xM - 0,477xD - 0,683xP + 0,051xS, \quad R^2 = \% 77,6 \quad (3.5)$$

Aksaray Yaylak:

$$KD = 35,1 - 2,55xT + 0,557xM - 0,2xD - 0,563xP - 4,48xS, \quad R^2 = \% 87,8 \quad (3.6)$$

Multicolor Red için çalışılan tüm çalışma parametrelerin istatistiksel açıdan kesme derinliği üzerinde anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki katkı oranları % 30,39 ile aşındırıcı boyutu, % 38,59 ile kesme hızı, % 21,23 ile çalışma basıncı, % 6,90 ile aşındırıcı besleme miktarı ve % 2,85 ile meme-örnek mesafesidir. Balaban Green için kesme derinliği üzerinde anlamlı etkiye sahip

çalışma parametreleri aşındırıcı boyutu ve kesme hızı olarak belirlenmiştir. Balaban Green’de çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 48,61 ile aşındırıcı boyutu ve % 31,36 ile kesme hızıdır. Bergama Grey için kesme derinliği üzerinde anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri kesme hızı, aşındırıcı boyutu ve meme-örnek mesafesidir. Bergama Grey’de çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 72,14 ile kesme hızı, % 16,97 aşındırıcı boyutu ve % 7,72 ile meme-örnek mesafesidir.

Multicolor Red, Balaban Green ve Bergama Grey’de çalışma parametrelerinin kesme derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Multicolor Red:

$$KD = 30,8 - 1,75xT + 0,695xM - 0,435xD + 1,19xP - 3,61xS, \quad R^2 = \% 90,6 \quad (3.7)$$

Balaban Green:

$$KD = 30,1 - 1,14xT + 0,118xM + 0,091xD + 0,296xP - 3,19xS, \quad R^2 = \% 81,9 \quad (3.8)$$

Bergama Grey:

$$KD = 31,0 - 1,70xT + 0,132xM + 0,287xD + 0,010xP - 1,85xS, \quad R^2 = \% 91,4 \quad (3.9)$$

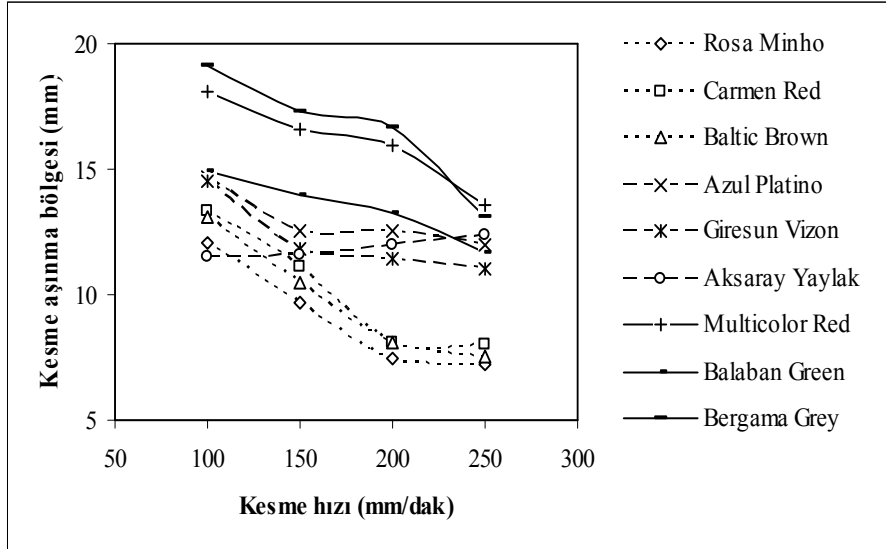
3.1.2. Kesme Aşınma Bölgesi Derinliği

3.1.2.1. Kesme Hızı Değişimi

Genel olarak örneklerin kesme aşınma bölgesi derinlikleri, kesme hızı artışı ile birlikte azalmıştır (Şekil 3.6). En düşük kesme aşınma bölgesi derinlikleri Rosa Minho, Carmen Red ve Baltic Brown’da elde edilirken en yüksek kesme aşınma bölgesi derinlikleri Bergama Grey, Balaban Green, Multicolor Red’de elde edilmiştir. Ancak, Aksaray Yaylak örneğinin kesme aşınma bölgesi derinliği kısıtlı seviyede de olsa artan kesme hızı birlikte bir artış içerisinde olmuştur.

Aşındırıcı su jeti ile kesme, erozyonla malzemeden parçacık koparma esasına dayanmaktadır. Kesme hızının artışı, malzeme yüzeyine temas edecek tanecik sayısını düşürür ve özellikle su/aşındırıcı karışımının malzemeye ilk temas ettiği bölgede (kesme aşınma bölgesi) az sayıda taneciğin kesme yapmasına neden olur. Bu da ilk temas eden taneciğin malzeme yüzeyinde oluşturduğu erozyonu derinleştirecek ve düzgün bir yüzeyin

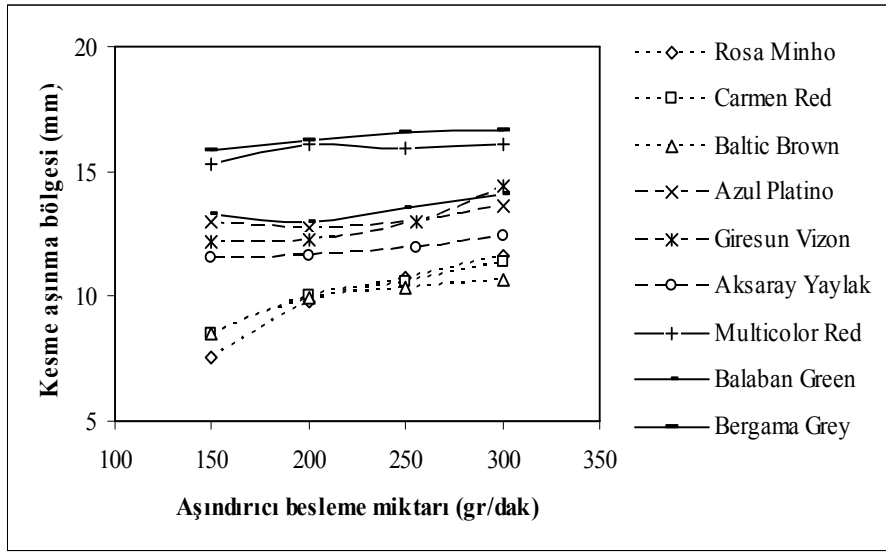
oluşmasını sağlayacak yeterli taneciğin ard arda gelmemesi anlamına gelir. Böylelikle kesme aşınma bölgesi derinliklerinde düşüşler meydana gelir.



Şekil 3.6. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin kesme hızına bağlı değişimi

3.1.2.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

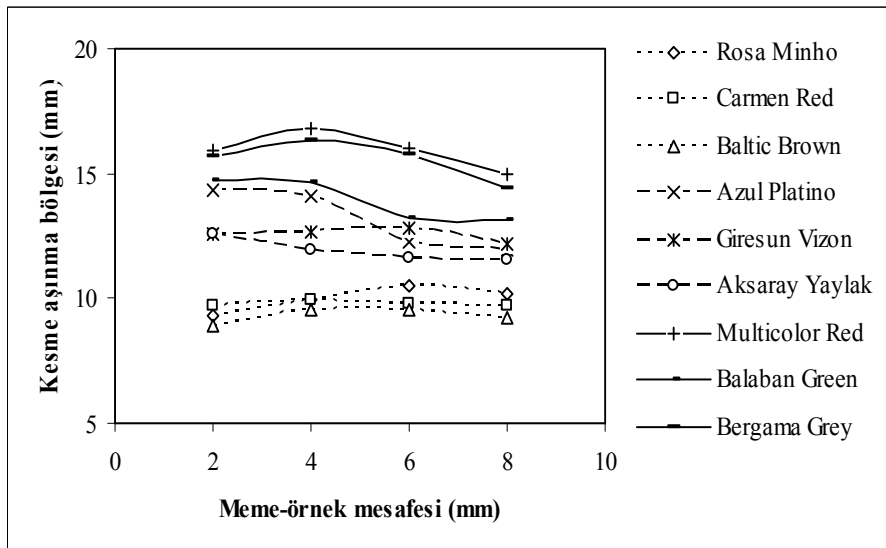
Aşındırıcı besleme miktarının artması, tüm örneklerin kesme aşınma bölgesi derinliklerini arttırmıştır. Bu artışlar özellikle iri taneli örneklerde daha belirgin iken orta ve ince taneli örneklerde daha kısıtlı seviye de gerçekleşmiştir (Şekil 3.7). Aşındırıcı besleme miktarının artışı, kesme anında malzeme yüzeyine etkiyecek aşındırıcı tanecik miktarının fazla olması anlamına gelir ve örnek kesme derinliklerinin buna bağlı olarak da kesme aşınma bölgesi derinliklerinin artması beklenir. Ancak, çalışılan örneklerden de görüldüğü üzere aşındırıcı miktarındaki artış kritik bir değerden sonra dar bir aralıkta da olsa örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin azalmasına yol açmıştır. Bu durumun ortaya çıkmasında, artan aşındırıcı miktarı ile aşındırıcı tanecikleri arasında aşırı sürtünmelerden dolayı parçalanmaların meydana gelmesi buna bağlı olarak bireysel aşındırıcı taneciklerin kesme yeteneklerini kaybetmesi muhtemel sebepler olarak gösterilebilir.



Şekil 3.7. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi

3.1.2.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi

Meme-örnek mesafesi değişiminin örnek kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerindeki etkisi iri taneli örneklerde artma, orta ve ince taneli örneklerde ise azalma eğilimi yönünde olmuştur (Şekil 3.8).

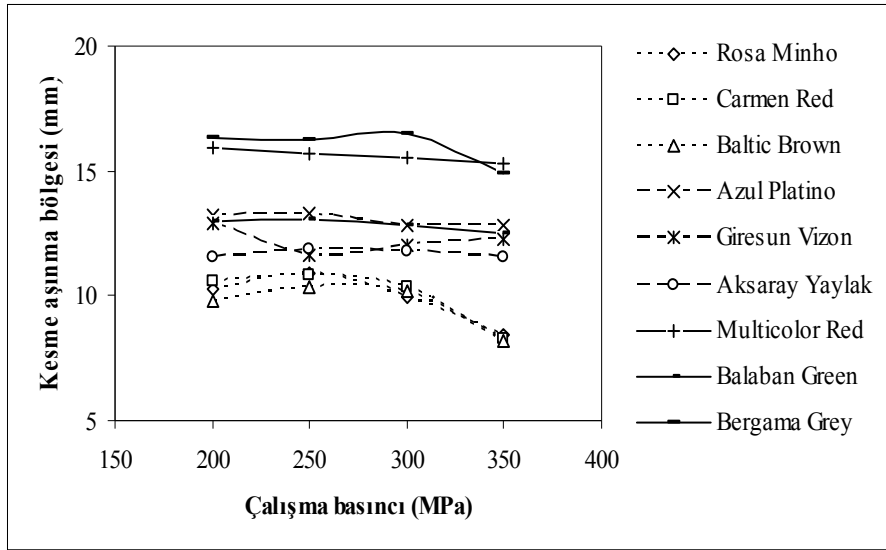


Şekil 3.8. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi

İri ve ince taneli kayalarda değişim genel bir kararlılık gösterirken bu iki grubun arasında kalan kayalardan Aksaray Yaylak ve Giresun Vizon'da bir kararsızlık tespit edilmiştir. Özellikle bu kayalarda belirgin olarak gözlenen bu durum için etkin faktörün kayaç içindeki iri-ince tane oranlarının olduğu düşünülebilir.

3.1.2.4. Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncının artışı ince taneli kayalarda kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin olmazken, iri taneli kayalarda belli bir değere kadar artış göstermiş sonrasında bu artış yerini azalmaya bırakmıştır (Şekil 3.9). Artan çalışma basıncının orta taneli kayaların kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerindeki etkisi diğer örnekler kadar belirgin değildir. Ayrıca, iri ve orta taneli kayalarda kesme aşınma bölgesi derinlikleri bütün kayalarda birbirine yakın iken ince taneli kayalardan Balaban Green'de diğer iki örneğe göre daha düşük kesme aşınma bölgesi derinliği elde edilmiştir.

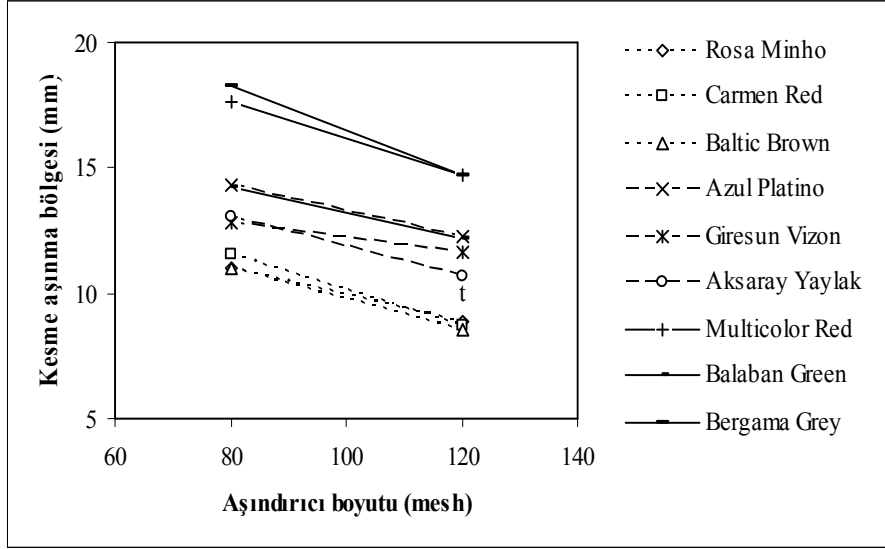


Şekil 3.9. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi

3.1.2.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi

Örnek kesme aşınma bölgesi derinlikleri, beklenildiği üzere ince boyutlu aşındırıcı ile daha düşük olmuştur. İri taneli kayalarda çok yakın kesme aşınma bölgesi derinlikleri

elde edilirken diğer kayaçlarda belli bir gruplanma olmadığı söylenebilir. Ancak, ince boyutlu kayaçlardan Balaban Green diğer iki örnekten daha düşük kesme aşınma bölgesi derinliğine sahiptir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi

İri boyutlu aşındırıcı tanecikleri, sahip oldukları ağırlık ve momentumdan dolayı malzemeyi daha hızlı ve derin kesebilirler. Buna karşın ince boyutlu aşındırıcı tanecikleri hem hafif olmalı hem de hareket yönünü koruyabilmelerinin zor olması nedeniyle malzemeyi daha yavaş keserler ve derine inemezler. Bu nedenle iri boyutlu aşındırıcı tanecikleri ile daha fazla kesme derinliği buna bağlı olarak da yüksek kesme aşınma bölgesi derinlikleri elde edilebilir. Çalışılan örneklerde elde edilen bu durum, Zeng ve Kim (1996)'in yürüttüğü bir çalışmanın sonuçları ile uyumluluk göstermektedir.

3.1.2.6. Varyans Analizi

Baltic Brown için kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri kesme hızı ve aşındırıcı boyutu olarak belirlenmiştir. Baltic Brown'da anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin örnek kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerindeki katkı oranları ise % 61,01 ile kesme hızı ve % 18,25 ile aşındırıcı boyutudur. Carmen Red için kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerinde bütün

çalışma parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Etkin parametrelerin kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerindeki katkı oranları ise % 22,16 ile aşındırıcı boyutu, % 55,12 ile kesme hızı, % 11,65 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 7,26 ile çalışma basıncı ve % 3,51 ile meme-örnek mesafesi şeklindedir. Rosa Minho için anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri kesme hızı, aşındırıcı boyutu ve aşındırıcı besleme miktarı olarak belirlenmiştir. Anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları da % 54,53 ile kesme hızı, % 9,23 ile aşındırıcı boyutu ve % 18,35 ile aşındırıcı besleme miktarıdır (Ek Tablo 2).

Baltic Brown, Carmen Red Rosa Minho'da çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Baltic Brown:

$$KAD = 15,9 - 1,91xT + 0,574xM + 0,641xD - 0,324xP - 2,40xS, R^2 = \% 89,1 \quad (3.10)$$

Carmen Red:

$$KAD = 17,4 - 1,90xT + 0,893xM + 0,395xD - 0,594xP - 2,83xS, R^2 = \% 90,3 \quad (3.11)$$

Rosa Minho:

$$KAD = 13,9 - 2,01xT + 1,32xM + 0,984xD - 0,594xP - 2,17xS, R^2 = \% 79,3 \quad (3.12)$$

Azul Platino için kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin çalışma parametreleri; aşındırıcı boyutu, meme-örnek mesafesi ve kesme hızıdır. Azul Platino'da etkin çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 34,37 ile aşındırıcı boyutu, % 29,58 ile meme-örnek mesafesi ve % 27,95 ile kesme hızı olarak hesaplanmıştır. Giresun Vizon için kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin çalışma parametreleri aşındırıcı boyutu, meme-örnek mesafesi ve kesme hızıdır.

Etkin çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 33,52 ile aşındırıcı boyutu, % 30,35 ile meme-örnek mesafesi ve %28,03 ile kesme hızı olarak bulunmuştur. Benzer şekilde Aksaray Yaylak için kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin çalışma parametreleri kesme hızı ve aşındırıcı boyutudur. Aksaray Yaylak'ta etkin çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 65,09 ile kesme hızı ve % 20,80 oranı ile aşındırıcı boyutu belirlenmiştir.

Azul Platino, Giresun Vizon ve Aksaray Yaylak'ta çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Azul Platino:

$$KAD = 19,4 - 0,761xT + 0,140xM - 0,677xD + 0,130xP - 2,11xS, R^2 = \%75,7 \quad (3.13)$$

Giresun Vizon:

$$KAD = 16,7 - 0,907xT - 0,108xM + 0,020xD - 0,083xP - 1,16xS, R^2 = \% 60,5 \quad (3.14)$$

Aksaray Yaylak:

$$KAD = 19,5 - 1,80xT - 0,000xM - 0,053xD + 0,221xP - 2,33xS, R^2 = \% 83,9 \quad (3.15)$$

Multicolor Red için kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin çalışma parametreleri % 31,11 katkı oranı ile aşındırıcı boyutu ve % 39,90 katkı oranı ile kesme hızıdır. Balaban Green için de aynı çalışma parametreleri etkin parametreler olarak ortaya belirlenmiştir. Anlamlı çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 43,03 ile aşındırıcı boyutu ve % 42,31 ile kesme hızıdır. Aynı çalışma parametreleri Bergama Grey için de kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde etkin parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin kesme aşınma bölgesi derinliği üzerindeki katkı oranları ise % 31,70 ile aşındırıcı boyutu ve % 49,21 ile kesme hızıdır.

Multicolor Red, Balaban Green ve Bergama Grey'de çalışma parametrelerinin kesme aşınma bölgesi derinliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Multicolor Red:

$$KAD = 23,1 - 1,38xT + 0,256xM - 0,267xD + 0,336xP - 2,89xS, R^2 = \% 71,2 \quad (3.16)$$

Balaban Green:

$$KAD = 18,8 - 0,861xT - 0,147xM - 0,097xD + 0,079xP - 2,02xS, R^2 = \% 84,0 \quad (3.17)$$

Bergama Grey:

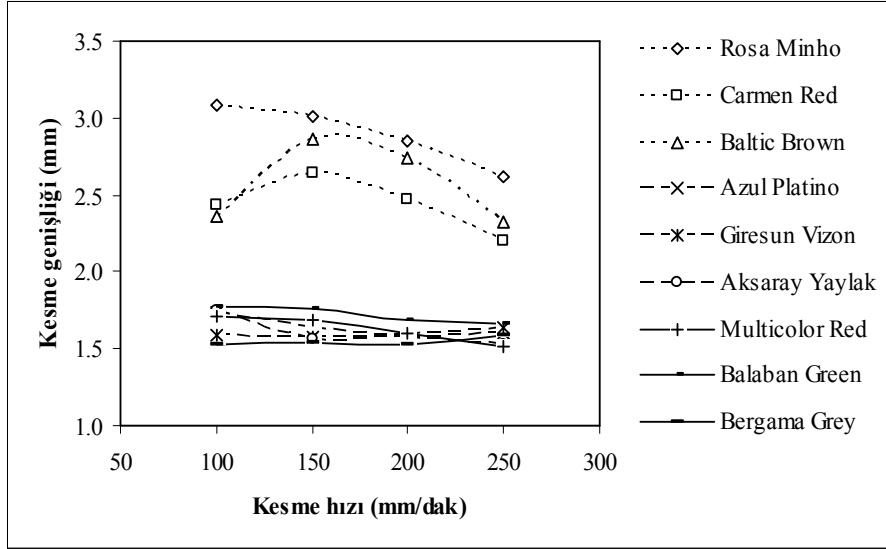
$$KAD = 24,5 - 1,90xT + 0,322xM + 0,374xD + 0,117xP - 3,52xS, R^2 = \% 81,0 \quad (3.18)$$

3.1.3. Kesme Genişliği

3.1.3.1. Kesme Hızı Değişimi

Kesme hızının artmasına bağlı olarak örnek kesme genişliklerinin değişimi, Şekil 3.11'de verilmiştir. Kesme hızının artması, genel olarak örnek kesme genişliklerinin düşmesine yol açmıştır. Bu değişim, iri taneli kayalarda belirgin olarak gerçekleşirken,

orta ve ince taneli kayaçlarda kısıtlı bir seviyede kalmıştır. Orta ve ince taneli kayaçlarda gözlenen durum birbirine çok yakın olmuştur.



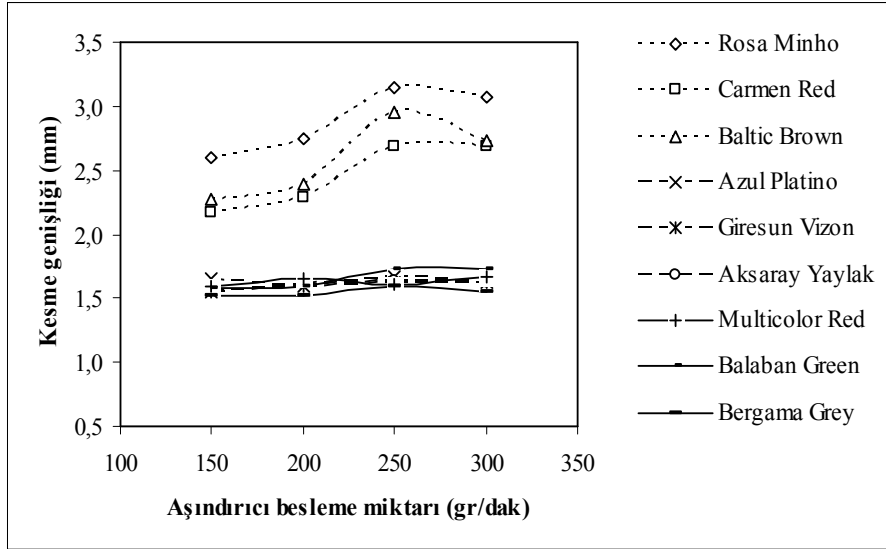
Şekil 3.11. Örnek kesme genişliklerinin kesme hızına bağlı değişimi

Örnek kesme genişliklerinin artan kesme hızına bağlı olarak düşmesi, malzeme üzerinde kesme hattı boyunca az sayıda veya miktarda aşındırıcı partikülün kesmede rol almasına ve hat boyunca bir yığılma dolayısıyla düzensiz kesilmelerin olmamasına bağlanılabilir. Çalışılan örneklerden bazılarında kesme genişliklerinin artan kesme hızına bağlı olarak düzenli bir değişim göstermemesi, hem malzeme özelliklerinden etkilenmesi hem de Hashish (1984b)'in de belirttiği gibi kesme hızı ile kesme genişliği arasındaki ilişkinin her zaman lineer olarak gerçekleşmemesinden kaynaklandığı söylenebilir.

3.1.3.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Aşındırıcı besleme miktarındaki artış, iri taneli kayaçlarda önemli değişmelere neden olurken bunların dışında kalan kayaçlarda hem ciddi bir değişime neden olmamıştır hem de elde edilen kesme genişlikleri birbirine çok yakın olmuştur. (Şekil 3.13). İri taneli kayaçlarda elde edilen kesme genişlikleri, diğer kayaçlardaki kesme genişliklerine göre oldukça yüksektir. İri taneli kayaçlarda kesme hattı boyunca ve/veya birim alanda yer alan tane sayısı ince taneli kayaçlara nazaran daha azdır. Bağlı olarak taneler arası sınır sayısı da az olacaktır. Su/aşındırıcı karışımı iri taneli kayaçlarda kesme hattı boyunca sürekli tane

ya da taneler boyunca kesme yapmak zorunda kalacaktır. Bu da mineral tanesinin jete karşı verdiği tepkinin sürekliliğini korumasına sebep olacak ve tane üzerinde düzensiz kesme yapılmasına yol açacaktır.



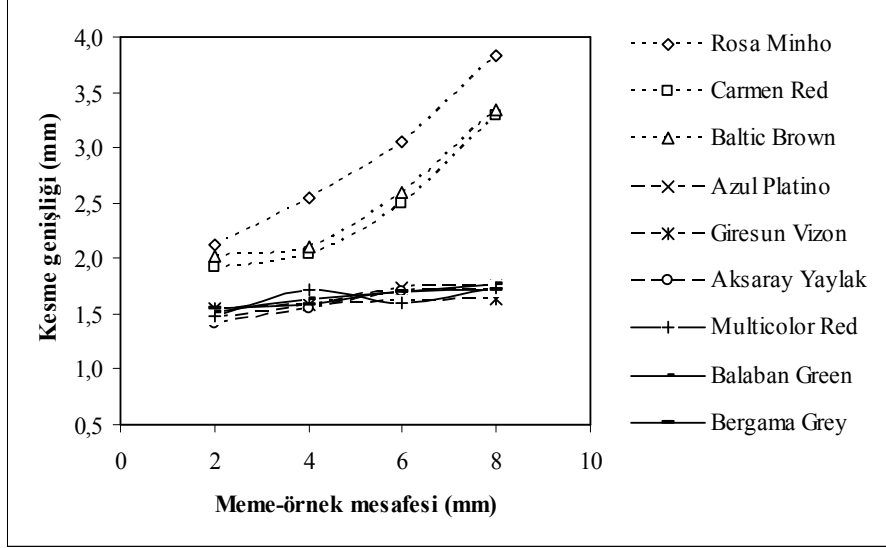
Şekil 3.12. Örnek kesme genişliklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi

Aynı mineral tanesi üzerinde kesme yapılacağından arkadan gelecek aşındırıcı partikülleri bir önceki partiküllerin yol açtığı düzensizliği düzeltmeyecektir. Bu da iri taneli kayalarda, aşındırıcı miktarının artmasıyla tane üzerinde aşındırıcı partikül yığılmalarına yol açacak ve yüksek kesme genişliklerinin elde edilmesine sebep olacaktır. Aşındırıcı miktarındaki artış, kesme hattı boyunca ve/veya birim alanda daha fazla tane ve taneler arası sınır yer alacağından, her bir mineralin verdiği tepkinin de farklılığı göz önüne alındığında nispeten daha düşük kesme genişliklerinin oluşmasına yol açacaktır.

3.1.3.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi

Örnek kesme genişliklerindeki en belirgin değişim, meme-örnek mesafesinin artmasıyla meydana gelmiştir. Her gruptaki örneklerin kesme genişlikleri artan meme-örnek mesafesine bağlı olarak artış göstermiştir (Şekil 3.13). Bu artış, iri taneli kayalarda daha belirgin ve daha geniş bir aralıkta meydana gelmiştir. Orta ve ince taneli kayalarda

ise düzensiz bir davranış sergileyen kesme genişliği dar bir aralıkta artmıştır. Ayrıca iri taneli kayaçların dışında tüm kayaçların kesme genişlikleri yakın değerlerdedir.

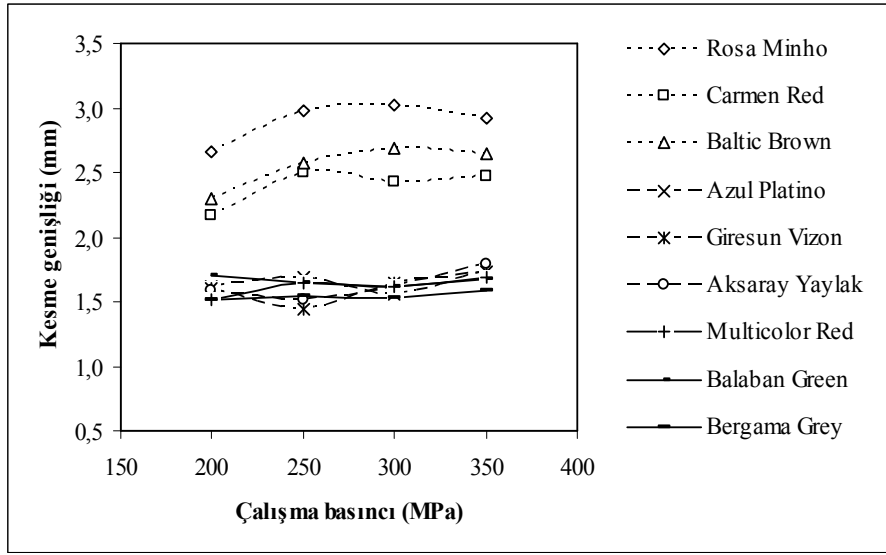


Şekil 3.13. Örnek kesme genişliklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi

Örnek kesme genişliklerinin meme-örnek mesafesinin artmasıyla gösterdiği artış eğilimi, başlıca su/aşındırıcı karışımının meme-örnek mesafesinin artmasıyla memeden çıkış anından sonra yayılarak çapını genişletmesi ile alakalıdır. Jet memeden çıkarken dar bir çaptadır ve meme-örnek mesafesi arttıkça jetin çapı da genişleyerek malzemeye nüfuz eder. Çapı genişleyen jetin etkin kesme gücü düşer ve kesme hattı boyunca geniş bir alana etkiyerek geniş yarıkların oluşmasına sebep olur.

3.1.3.4. Çalışma Basıncı Değişimi

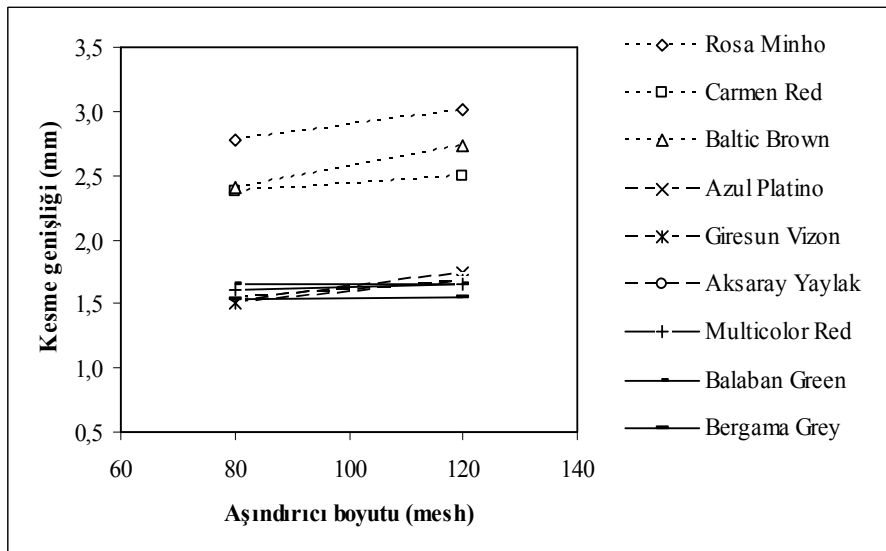
Çalışma basıncındaki artış iri taneli kayaçlarda, kesme genişliğinin diğer kayaçlara oranla önemli oranlarda yüksek olmasına sebep olmuştur (Şekil 3.14). Ayrıca, çalışma basıncının 250–300 MPa değerlerine kadar artan kesme genişliği bu değerden sonra azalmıştır. Daha ince tane boyutlarındaki kayaçlarda ise birbirine yakın kesme genişlikleri elde edilirken değişme dar bir aralıkta meydana gelmiştir. Artan çalışma basıncına göre, örnek kesme genişliklerinde meydana gelen artma eğilimi yüksek basınçlardaki jetin içerisinde yer alan aşındırıcı partiküllerin yüksek hız ve enerjiye sahip olmasıyla ilişkilendirilebilir.



Şekil 3.14. Örnek kesme genişliklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi

3.1.3.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi

Çalışılan örneklerin tamamında, kesme genişlikleri ince boyutlu aşındırıcı ile artmıştır. Bu artış, iri taneli kayalarda daha fazladır. Öte yandan, ince ve orta taneli kayaların kesme genişlikleri benzer davranış içerisinde (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Örnek kesme genişliklerinin aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi

İri taneli kayaçların kesme genişlikleri diğer kayaçlara göre daha yüksek olmasına rağmen tüm kayaçlarda ki değişim kısıtlı aralıkta kalmıştır. İnce boyutlu aşındırıcı ile geniş kesme genişliklerinin elde edilmesi, küçük boyuttaki aşındırıcı partiküllerinin örnek üzerinde kesme hattı boyunca belli bir noktada iri boyutlu aşındırıcı partiküllerine göre daha fazla yer kaplamasının muhtemel bir sonucudur. Ayrıca, ince boyutlu aşındırıcı partiküllerin sahip oldukları enerjiyi daha çabuk kaybetmeleri kesme anındaki etkin kesme yeteneklerinin daha çabuk kaybolmasına neden olur. Buda düzensiz kesmeye sebebiyet vereceğinden geniş kesme aralıklarının elde edilmesine yol açar.

3.1.3.6. Varyans Analizi

Baltic Brown için kesme genişliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı besleme miktarı olarak belirlenmiştir. Bu çalışma parametrelerinin örnek kesme genişlikleri üzerindeki katkı oranları ise % 50,07 ile meme-örnek mesafesi ve % 23,75 ile aşındırıcı besleme miktarıdır. Carmen Red için kesme genişliği üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri yalnızca meme-örnek mesafesidir. Carmen Red'de anlamlı etkiye sahip çalışma parametresinin kesme genişliği üzerindeki katkı oranı ise % 65,61'dir. Rosa Minho için kesme genişliği üzerinde bütün çalışma parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışma parametrelerinin kesme genişliği üzerindeki katkı oranları da % 77,46 ile meme-örnek mesafesi, % 9,60 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 2,64 ile aşındırıcı boyutu, % 5,60 ile kesme hızı ve % 3,84 ile çalışma basıncıdır (Ek Tablo 3).

Baltic Brown, Carmen Red Rosa Minho'da çalışma parametrelerinin kesme genişliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Baltic Brown:

$$KG = 0,331 - 0,025xT + 0,217xM + 0,383xD + 0,125xP + 0,328xS, R^2 = \% 62,5 \quad (3.19)$$

Carmen Red:

$$KG = 0,654 - 0,0868xT + 0,203xM + 0,454xD + 0,0733xP + 0,116xS, R^2 = \% 75,3 \quad (3.20)$$

Rosa Minho:

$$KG = 0,859 - 0,154xT + 0,181xM + 0,563xD + 0,0800xP + 0,238xS, R^2 = \% 93,4 \quad (3.21)$$

Azul Platino için kesme genişliği üzerinde etkin çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi, aşındırıcı boyutu, aşındırıcı besleme miktarı ve kesme hızıdır. Etkin çalışma parametrelerinin kesme genişliği üzerindeki katkı oranları ise % 38,68 ile meme-örnek mesafesi, % 10,72 ile aşındırıcı boyutu, % 21,66 ile aşındırıcı besleme miktarı ve % 19,54 ile kesme hızıdır. Giresun Vizon için kesme genişliği üzerindeki etkin çalışma parametresi % 76,82 katkı oranı ile sadece meme-örnek mesafesidir Aksaray Yaylak için ise kesme genişliği üzerinde tüm çalışma parametrelerinin istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip olduğu görülmüştür. Etkin çalışma parametrelerinin kesme genişliği üzerindeki katkı oranları ise % 75,24 ile meme-örnek mesafesi, % 8,99 ile kesme hızı, % 8,25 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 2,35 ile aşındırıcı boyutu ve % 4,51 ile çalışma basıncı olmuştur.

Azul Platino, Giresun Vizon ve Aksaray Yaylak'ta çalışma parametrelerinin kesme genişliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Azul Platino:

$$KG = 1,16 - 0,0473xT - 0,0033xM + 0,103xD + 0,0063xP + 0,216xS, R^2 = \% 76,5 \quad (3.22)$$

Giresun Vizon:

$$KG = 1,05 + 0,0187xT + 0,0247xM + 0,0293xD + 0,053xP + 0,166xS, R^2 = \%52,9 \quad (3.23)$$

Aksaray Yaylak:

$$KG = 1,19 - 0,064xT + 0,024xM + 0,089xD + 0,043xP + 0,12xS, R^2 = \% 58,0 \quad (3.24)$$

Multicolor Red için kesme genişliği üzerinde etkin çalışma parametresi yalnızca meme-örnek mesafesidir. Meme-örnek mesafesinin kesme genişliği üzerindeki katkı oranı % 38,07'dir. Balaban Green için kesme genişliği üzerindeki etkin çalışma parametresi aşındırıcı boyutu olarak belirlenmiştir. Bu parametrenin Balaban Green kesme genişliği üzerindeki katkı oranı ise % 19,65'dir. Bergama Grey'de kesme genişliği meme-örnek mesafesi, aşındırıcı boyutu ve çalışma basıncı parametrelerinden etkilenmiştir. Etkin çalışma parametrelerinin katkı oranları ise % 53,95 ile meme-örnek mesafesi, % 7,67 ile aşındırıcı boyutu ve % 17,20 ile çalışma basıncıdır.

Multicolor Red, Balaban Green ve Bergama Grey'de çalışma parametrelerinin kesme genişliği ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Multicolor Red:

$$KG = 1,34 - 0,0675xT + 0,0190xM + 0,0645xD + 0,067xP + 0,055xS, R^2 = \% 67,2 \quad (3.25)$$

Balaban Green:

$$KG = 11,25 + 0,039xT + 0,059xM + 0,082xD - 0,021xP + 0,005xS, R^2 = \% 66,4 \quad (3.26)$$

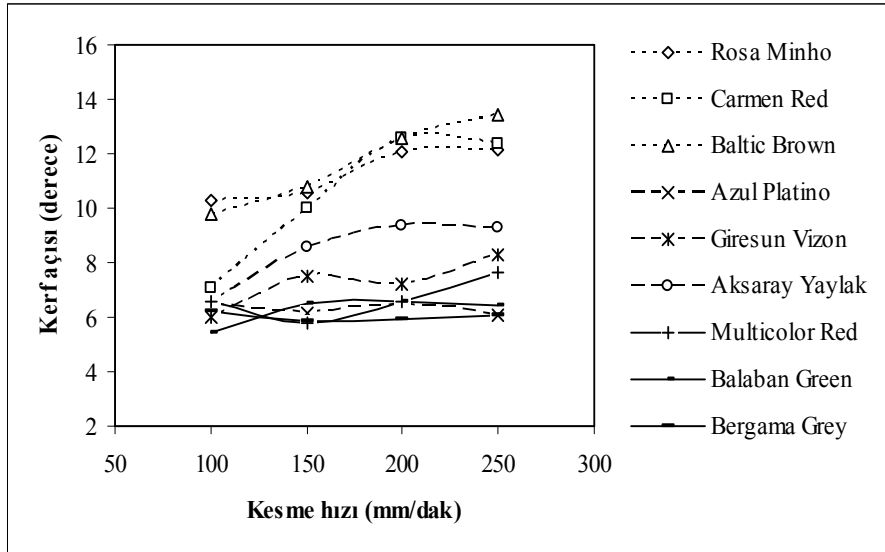
Bergama Grey:

$$KG = 1,43 + 0,0157xT + 0,0187xM - 0,0247xD + 0,0258xP + 0,0188xS, R^2 = \% 53 \quad (3.27)$$

3.1.4. Kerf Açısı

3.1.4.1. Kesme Hızı Değişimi

Çalışılan örneklerin kerf açıları incelendiğinde, genel eğilimin artan kesme hızına bağlı olarak kerf açıları artması yönünde olduğu görülmektedir (Şekil 3.16). İri taneli kayalarda en yüksek kerf açıları elde edilmiştir. İri taneli kayaları sırasıyla orta ve ince taneli kayaların kerf açıları takip ettiği söylenebilir.



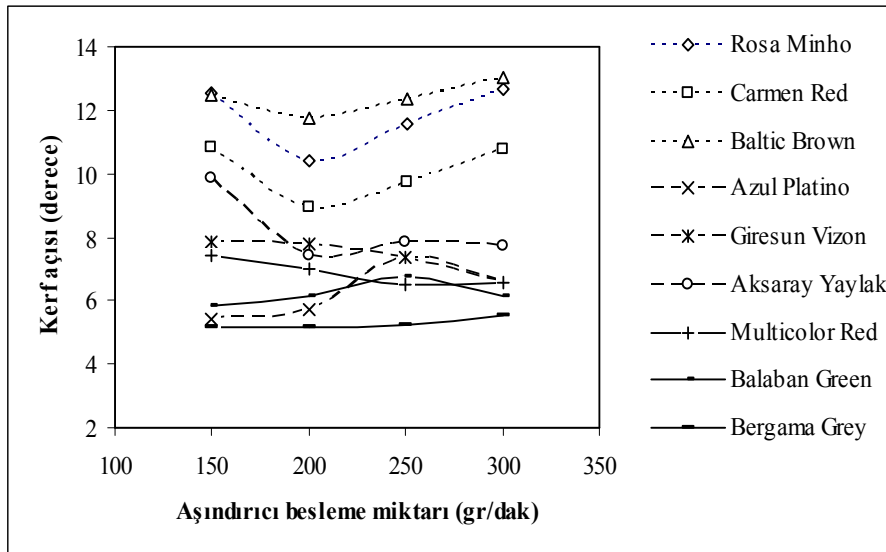
Şekil 3.16. Örnek kerf açılarının kesme hızına bağlı değişimi

Aşındırıcı su jeti ile kesmede; genel olarak malzeme kerf açıları, jetin malzeme üzerinde nüfuz etme süresinin azalmasından dolayı malzemeden parçacık koparmak için gereken enerji üzerinde büyük etkisi olan kesme hızının artışına bağlı olarak artar (Hamatani ve Ramulu, 1990; Shanmugam vd., 2008). Kesmede aktif rol oynayan aşındırıcı tanecikleri, artan hızla beraber yeteri kadar malzemeyle temas sağlayamayacaktır. Malzeme üst

kısımında dar aralıkta yarıkların oluşması sağlansa da artan hızdan dolayı malzemenin alt kısmını aktif olarak kesemeyecek ve burada düzensiz, geniş yarıkların oluşmasına sebep olacaktır. Bu nedenle, kesme hızındaki artış, yüksek kerf açılarının elde edilmesine sebep olabilecektir.

3.1.4.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Çalışılan kayaçların kerf açılarının aşındırıcı besleme miktarının artışına verdikleri tepki, aşındırıcı besleme miktarının ilk seviyelerinde kerf açılarının düşmesi yönünde olsa da aşındırıcı miktarının artmasıyla kerf açılarının artması eğiliminde olmuştur. Bu artış iri taneli kayaçlarda diğer kayaçlara göre daha belirgindir (Şekil 3.17). Aşındırıcı besleme miktarının artmasıyla kesilen malzemeden daha fazla parçacık koparılması/uzaklaştırılması beklenildiği için düzenli bir kerf aralığının oluşması, buna bağlı olarak da düşük kerf açılarının oluşması beklenir.



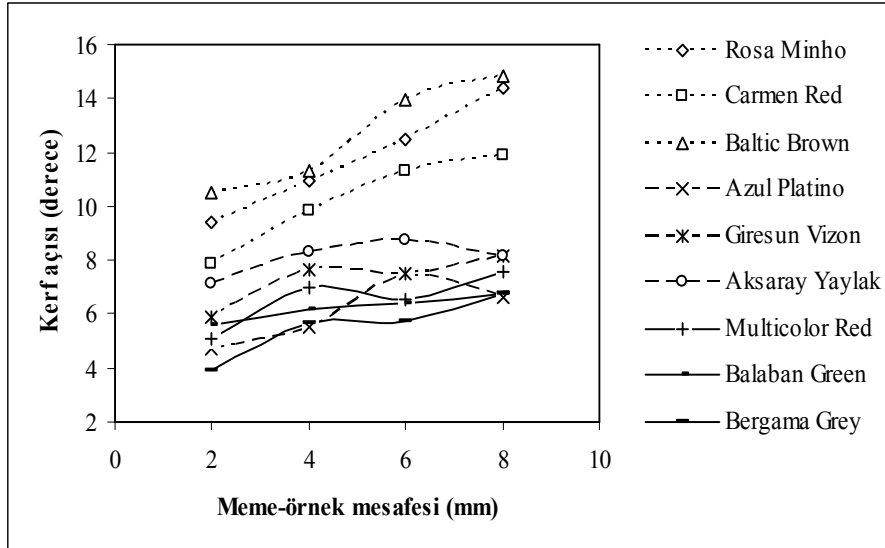
Şekil 3.17. Örnek kerf açılarının aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi

Ancak; Shanmugam and Masood (2009)'un gerçekleştirdikleri bir çalışmada, malzeme kerf açılarının aşındırıcı besleme miktarından açık bir şekilde etkilenmediği ortaya konulmuştur. Araştırmacılar, kerf açısının artan aşındırıcı ile birlikte atma eğiliminde olsa da bu değişimin çok kısıtlı bir seviyede gerçekleştiğini, bu nedenle de bu parametrenin etkisinin ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada, malzemeden parçacık

koparılması için jetten aşındırıcı parçacıklarına iletilen kritik bir enerji olduğunu, bu kritik değerden sonra yapılan herhangi bir aşındırıcı artışının kesme işlemi üzerinde etkin olmayacağı ifade edilmiştir.

3.1.4.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi

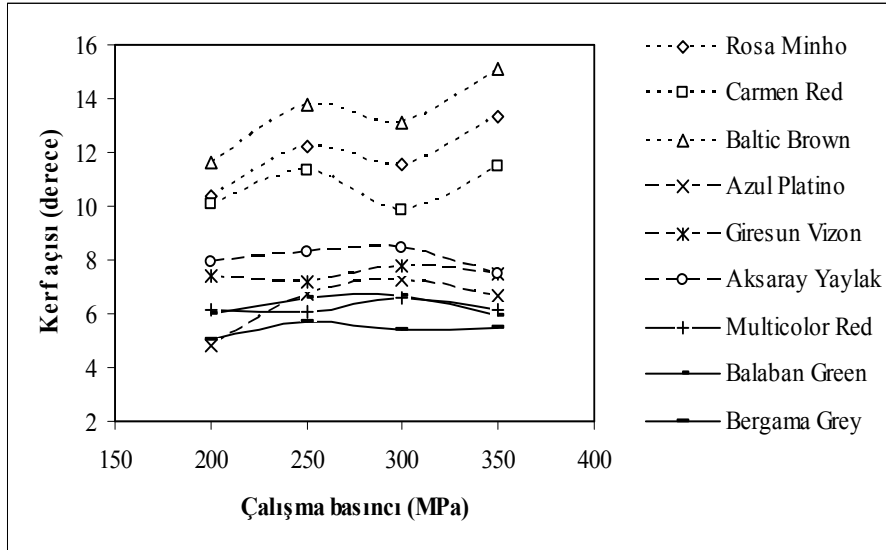
Örnek kerf açıları, meme-örnek mesafesi artışından olumsuz etkilenmiştir. Örneklerin kerf açıları beklenildiği üzere artan meme-örnek mesafesine bağlı olarak artış eğiliminde olmuştur. Bu değişim iri taneli kayaçlarda net bir şekilde meydana gelmiştir (Şekil 3.18). Literatürde, malzeme kerf açılarının artan meme-örnek mesafesine göre arttığını ifade eden çok sayıda çalışmaya rastlamak mümkündür (Chen vd., 1996a; Duflou vd., 2001; Wang ve Wong, 1999). Meme-örnek mesafesinin artmasıyla, memeden çıkan jet/aşındırıcı karışımı çıkış anından itibaren çapını genişleterek malzeme yüzeyine temas eder. Bu durumda, jet/aşındırıcı karışımı sahip olduğu enerjiyi çabuk kaybeder ve bu karışım malzeme alt bölümüne ulaştığında kesme için yeterli enerjiye sahip olmaz. Bu nedenle, malzemenin alt tarafları ya kesilmeden kalır, ya da geniş, düzensiz kesmelere sebep olur. Bu da geniş kerf açılarının oluşmasına sebebiyet verir.



Şekil 3.18. Örnek kerf açılarının meme-örnek mesafesine bağlı değişimi

3.1.4.4. Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncının artışı orta ve ince taneli kayalarda kerf açılarını bir eşik değere kadar arttırmış ancak bu değeri izleyen aralıkta düşürmüştür. İri taneli kayalarda ise çalışılan aralıkta gerçekleşen toplam değişim genel olarak artma yönündedir (Şekil 3.19). Hocheng ve Chang (1994)'in yürüttükleri bir çalışmada, aşındırıcı su jeti ile kesmede malzeme kerf açılarının artan çalışma basıncıyla birlikte düştüğünü ifade etmişlerdir. Kerf açılarında meydana gelen bu düşüşün, artan basıncın jet içerisindeki aşındırıcı partiküllerine kesme için yeterli enerjiyi vermesiyle ilişkilendirmişlerdir.

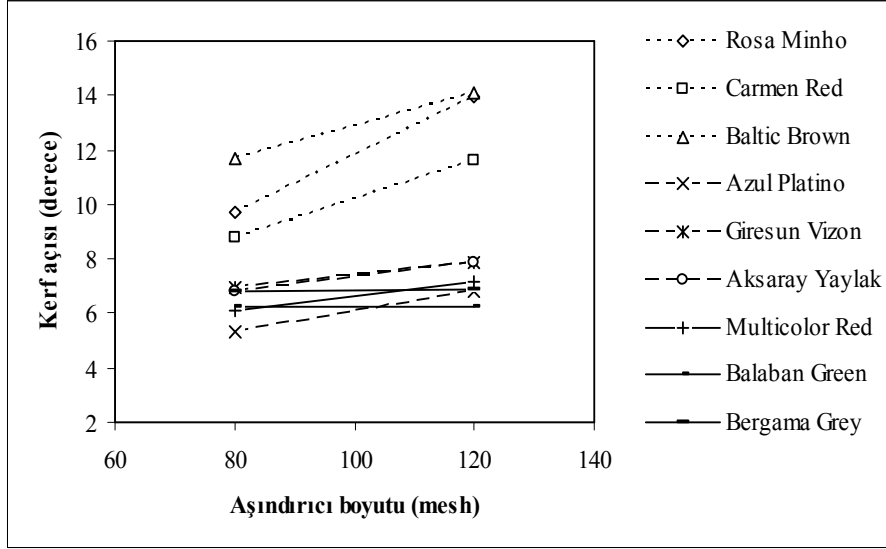


Şekil 3.19. Örnek kerf açılarının çalışma basıncına bağlı değişimi

Ancak; su basıncının artması bazen aksi durumların da ortaya çıkmasına sebep olabileceği ifade eden araştırmacılar, bunda memeden çıkan ve yayılarak malzemeye temas eden jetin etkin çapının genişlemesine bağlamışlardır. Etkin çapı genişleyen jet, malzeme alt taraflarına doğru ilerlemesi için yeterli enerjiye sahip olmasına rağmen kesme gücü zayıf olduğu için alt taraflarda geniş yarıkların oluşmasına sebep olabilmektedirler. Bu nedenle, kerf açılarında artış oluşabilmektedir.

3.1.4.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi

Çalışılan örneklerin kerf açıları incelendiğinde, literatürde var olan başka çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışılan tüm örneklerde iri boyutlu aşındırıcı ile daha düşük kerf açıları elde edilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Örnek kerf açılarının aşındırıcı boyutuna bağlı değişimi

Bu değişim ince taneli kayaçlara nazaran iri ve orta iri taneli kayaçlarda daha belirgindir. İnce boyutlu aşındırıcı ile büyük kerf açılarının elde edilmesi sonucunun aşındırıcı taneciklerinin ağırlığı ve momentumdan dolayı hareket yönlerini koruyabilmelerinin olduğu söylenebilir.

3.1.4.6. Varyans Analizi

Baltic Brown için kerf açısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri aşındırıcı boyutu, kesme hızı ve meme-örnek mesafesi olarak belirlenmiştir. Anlamlı etkiye sahip bu çalışma parametrelerinin katkı oranları ise % 11,93 ile aşındırıcı boyutu, % 34,75 ile kesme hızı ve % 33,02 ile meme-örnek mesafesi şeklindedir. Carmen Red için kerf açısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri aşındırıcı boyutu, kesme hızı ve meme-örnek mesafesi olarak belirlenmiştir. Carmen Red'de anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranları

ise % 17,81 ile aşındırıcı boyutu, % 37,35 ile kesme hızı ve % 22,12 ile eme-örnek mesafesidir. Rosa Minho için kerf açısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri aşındırıcı boyutu ve meme-örnek mesafesidir. Anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranları da % 43,29 ile aşındırıcı boyutu olurken, bu oran meme-örnek mesafesinde % 32,31 olarak belirlenmiştir (Ek Tablo 4).

Baltic Brown, Carmen Red Rosa Minho'da çalışma parametrelerinin kerf açısı ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Baltic Brown:

$$KA = 0,79 + 1,39xT - 0,230xM + 1,64xD + 0,599xP + 2,38xS, \quad R^2 = \% 65,2 \quad (3.28)$$

Carmen Red:

$$KA = - 1,65 + 1,50xT + 0,213xM + 1,37xD - 0,021xP + 2,81xS, \quad R^2 = \% 64,8 \quad (3.29)$$

Rosa Minho:

$$KA = - 1,07 + 0,077xT + 0,149xM + 1,64xD + 0,741xP + 4,24xS, \quad R^2 = \% 82,4 \quad (3.30)$$

Azul Platino için kerf açısı üzerinde etkin çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı boyutudur. Etkin çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranı ise % 35 ile meme-örnek mesafesi ve % 16,47 ile aşındırıcı boyutudur. Giresun Vizon için kesme hızı, meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı boyutu etkin çalışma parametreleri olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin kerf açısı üzerindeki katkı oranları ise % 43,53 ile kesme hızı, % 31,78 ile meme-örnek mesafesi ve % 8,50 ile aşındırıcı boyutudur. Aksaray Yaylak için etkin çalışma parametreleri kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı boyutu olarak bulunmuştur. Etkin parametrelerin kerf açısı üzerindeki katkı oranları % 46,65 ile kesme hızı, % 30,37 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 17,54 ile meme-örnek mesafesi ve % 3,31 ile aşındırıcı boyutudur.

Azul Platino, Giresun Vizon ve Aksaray Yaylak'ta çalışma parametrelerinin kerf açısı ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Azul Platino:

$$KA = - 0,05 - 0,008xT + 0,604xM + 0,748xD + 0,228xP + 1,45xS, \quad R^2 = \% 82,2 \quad (3.31)$$

Giresun Vizon:

$$KA = 3,35 + 0,846xT - 0,435xM + 0,644xD + 0,010xP + 0,918xS, \quad R^2 = \% 75,2 \quad (3.32)$$

Aksaray Yaylak:

$$KA = 5,70 + 0,437xT - 0,487xM + 0,454xD + 0,018xP + 0,940xS, \quad R^2 = \% 89,6 \quad (3.33)$$

Multicolor Red için kerf açısı üzerinde etkin çalışma parametreleri çalışma basıncı, meme-örnek mesafesi ve kesme hızı olarak belirlenmiştir. Etkin çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranı ise % 27,79 ile çalışma basıncı, % 26,52 ile meme-örnek mesafesi ve % 23,24 ile kesme hızıdır. Balaban Green için etkin çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi, aşındırıcı besleme miktarı ve kesme hızıdır. Balaban Green'de etkin olan çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranları ise % 35,08 ile meme-örnek mesafesi, % 29,25 ile aşındırıcı besleme miktarı ve % 22,59 ile kesme hızıdır. Benzer şekilde Bergama Grey için etken çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi, kesme hızı ve aşındırıcı besleme miktarıdır. Bergama Grey'de etkin çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki katkı oranları ise % 55,33 ile meme-örnek mesafesi, % 18,71 ile kesme hızı ve % 16,38 ile aşındırıcı besleme miktarıdır.

Multicolor Red, Balaban Green ve Bergama Grey'de çalışma parametrelerinin kerf açısı ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Multicolor Red:

$$KA = 3,47 + 0,399xT - 0,089xM + 0,480xD + 0,209xP + 0,469xS, \quad R^2 = \% 51,9 \quad (3.34)$$

Balaban Green:

$$KA = 5,31 + 0,266xT + 0,134xM + 0,294xD - 0,165xP + 0,064xS, \quad R^2 = \% 60,0 \quad (3.35)$$

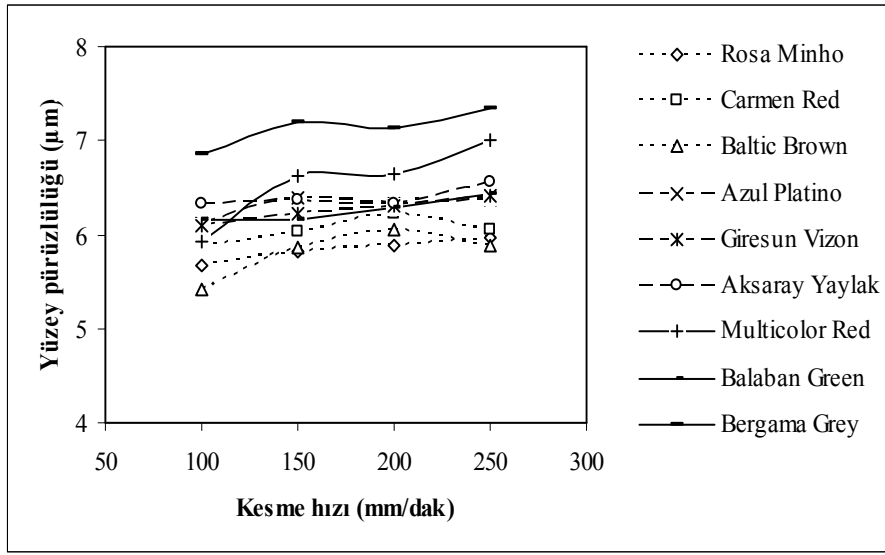
Bergama Grey:

$$KA = 5,47 - 0,720xT - 0,088xM + 0,646xD - 0,099xP + 0,289xS, \quad R^2 = \% 51,1 \quad (3.36)$$

3.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü

3.1.5.1. Kesme Hızı Değişimi

Kesme hızındaki artış çalışılan kayaçların yüzey pürüzlülüklerinin artmasına sebep olmuştur. Bu artış, ince taneli kayaçlarda daha belirgin gerçekleşmiş, orta ve iri taneli kayaçlarda kısıtlı seviyede kalmıştır (Şekil 3.20).



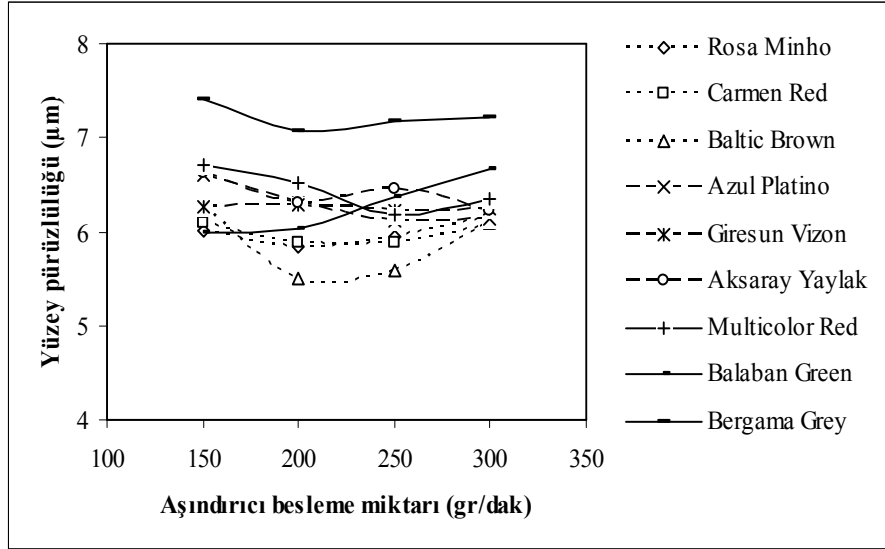
Şekil 3.21. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin kesme hızına bağlı değişimi

Aşındırıcı su jeti ile kesme işleminde; jet/aşındırıcı karışımının hızını arttırarak malzeme yüzeyinde kesme işlemi gerçekleştirmesi, kesilen malzeme üzerinde belli bir noktanın az sayıda aşındırıcı partikülüne maruz kalmasına neden olur. Bu da, kesme anında ilk etapta darbe uygulayan aşındırıcı partiküllerini takip edecek ve ilk darbeden sonra oluşan düzensizlikleri ortadan kaldıracak yeterli miktarda aşındırıcı partikülünün malzeme yüzeyine temas etmesini engelleyecektir. Bu nedenle, artan kesme hızı ile beraber malzeme kesim yüzeyinde daha fazla girinti ve çıkıntının oluşması söz konusu olacaktır. Bu girinti/çıkıntılarda malzeme yüzey pürüzlülüğünün artmasına sebep olacaktır.

3.1.5.2. Aşındırıcı Besleme Miktarı Değişimi

Aşındırıcı besleme miktarındaki artan değişim, örnek yüzey pürüzlülüklerinin ilk önce düşmesine, aşındırıcı miktarının daha da artmasıyla pürüzlülüklerin artmasına neden olmuştur. Bu değişimler, özellikle iri ve ince taneli kayalarda daha belirgin gerçekleşmiştir (Şekil 3.21). Kesme işleminde, yüksek oranda aşındırıcı besleme yapılması karışım ve kesme esnasında fazla miktarda aşındırıcı partikülünün yer alması anlamına gelir. Böylelikle, örnek kesme derinlikleri buna bağlı olarak kesme aşınma bölgesi derinliklerinde artışların olması beklenir. Fazla miktarda aşındırıcı partikülü birbirini takip ederek öndeki partikül/partiküllerin kesme yüzeyinde yol açtığı tahribatı düzeltecektir.

Böylece örnek kesme yüzeylerinin düzgün kesilmesi sağlanacak ve düşük yüzey pürüzlükleri elde edilecektir.

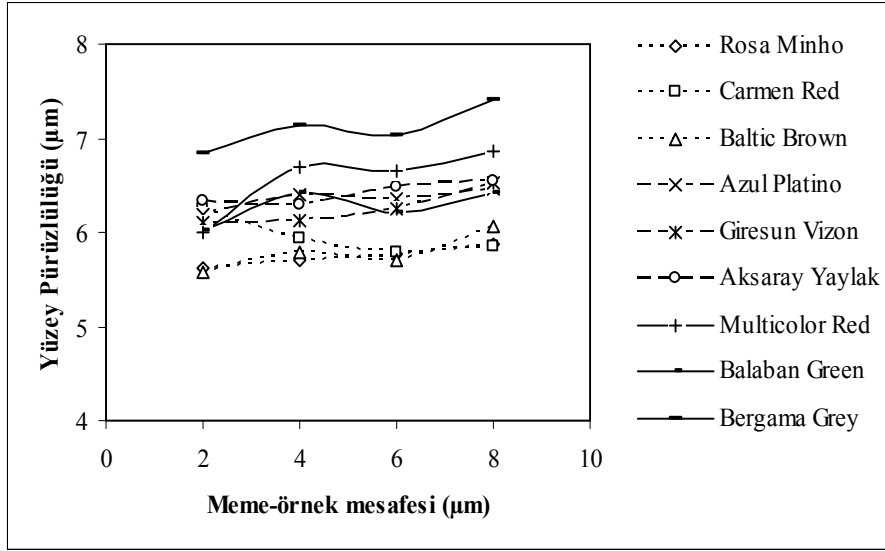


Şekil 3.22. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin aşındırıcı besleme miktarına bağlı değişimi

Ancak; bazen de aşındırıcı besleme miktarının artması örnek yüzey pürüzlülüklerini arttırabilmektedir. Bu durumun muhtemel bir sebebi, aşındırıcı partiküllerin aşırı sürtünmeden dolayı parçalanarak küçük boyutlara ayrılması ve sahip oldukları kinetik enerjileri kaybederek kesmede aktif rol oynayamamasıdır. Bu durum Azmir and Ahsan (2009) tarafından da belirtilmiştir.

3.1.5.3. Meme-örnek Mesafesi Değişimi

Artan meme-örnek mesafesi, orta ve ince taneli kayaçların yüzey pürüzlülüklerinin belirgin bir şekilde artmasına sebep olurken, iri boyutlu kayaçlarda ise meme-örnek mesafesinin ilk seviyelerinde pürüzlülük değerlerinde düzensiz bir değişime sebep olmuştur. Ancak, meme-örnek mesafesinin daha da artmasıyla örneklerin yüzey pürüzlülüğü kısıtlı bir seviyede de olsa artma eğilimine geçmiştir. En düşük pürüzlülük değerleri iri taneli kayaçlarda elde edilmiş, bunu orta ve ince taneli kayaçlar izlemiştir (Şekil 3.22).

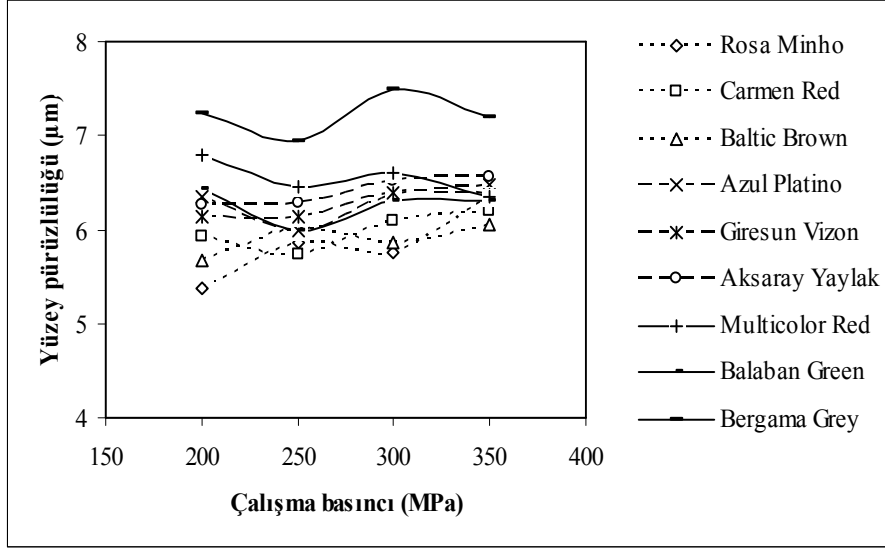


Şekil 3.23. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin meme-örnek mesafesine bağlı değişimi

Meme-örnek mesafesinin artması, jet içindeki aşındırıcı partiküllerin malzeme üzerinde daha geniş alana temas etmesi anlamına gelir. Aşındırıcı partiküllerin dağılarak kesme işlemini gerçekleştirmesi, toplu halde düzenli kesme yüzeylerinin oluşması olanağını düşürecektir. Dolayısıyla örnek kesme yüzeyleri düzenli olmayıp çok sayıda girinti/çıkıntı oluşması söz konusu olacaktır. Bu da kesme yüzeylerinde pürüzlülük değerlerinin artmasına yol açacaktır. Chen, vd. (1996b) ve Karakurt (2007), meme-örnek mesafesi artışının örnek yüzey pürüzlülük değerlerini arttırdığını gerçekleştirdikleri çalışmalarda ifade etmişlerdir.

3.1.5.4. Çalışma Basıncı Değişimi

Çalışma basıncındaki artan değişim başlangıçta ince ve orta taneli kayaçların yüzey pürüzlülüklerinin düşmesine sebep olmasına rağmen, basıncın daha da artmasıyla örnek yüzey pürüzlülükleri artma eğiliminde olmuştur. Ek olarak, ince taneli kayaçlarda değişim diğer kayaçlardaki değişime göre daha dalgalı ve düzensiz gerçekleştiği söylenebilir (Şekil 3.24).



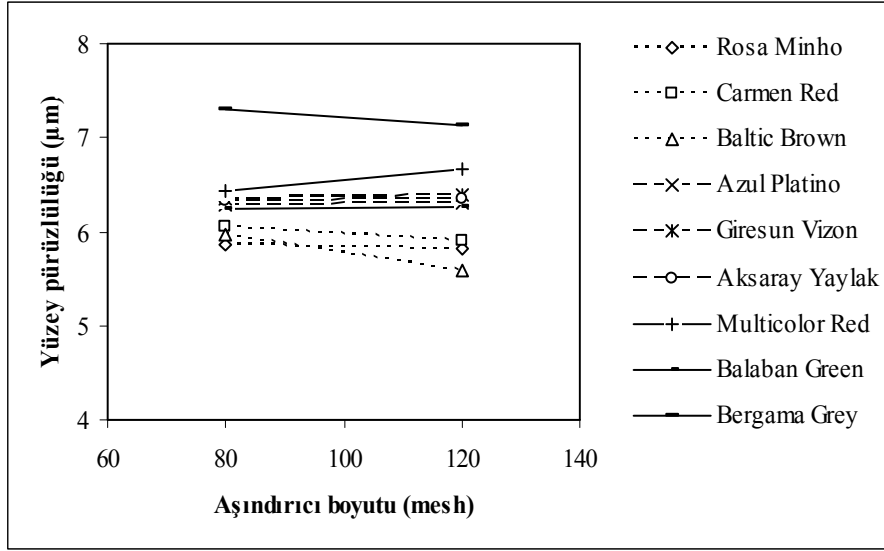
Şekil 3.24. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi

Yüksek çalışma basınçları, jet içerisindeki aşındırıcı taneciklerine kesme için gereken enerjiyi verir. Gereken enerjiyi kazanan aşındırıcı tanecikleri kesme kapasitelerini artırarak malzemeden daha fazla parçacık kopmasını sağlarlar. Bu durumda, kesme yüzeylerinin düzenli olması sağlanabilir. Ancak, nadiren de olsa yüksek basınçlar, aşındırıcı tanecikleri arasındaki enerji dağılımı ve hızın etkisiyle aşındırıcı taneciklerin parçalanmasına yol açabilirler. Böylelikle, aşındırıcı tanecikler bireysel olarak etkin kesme güçlerini kaybeder ve kaba kesme yüzeylerin oluşmasına sebep olabilirler. Bu nedenle, artan çalışma basıncına bağlı olarak örnek yüzey pürüzlülüklerinde artışların olabileceği beklenilebilir.

3.1.5.5. Aşındırıcı Boyutu Değişimi

Aşındırıcı boyutundaki değişim, örnek yüzey pürüzlülüklerinde istikrarlı bir değişime sebep olmamıştır. Şöyle ki; iri taneli kayaçlarda ince boyutlu aşındırıcı ile daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Buna karşın orta taneli kayaçlarda ince boyutlu aşındırıcı ile daha yüksek pürüzlülük oluşmuştur. Ancak bu değişimi oldukça kısıtlı bir seviyede kalmıştır. İnce taneli kayaçlarda ise Bergama Grey dışındaki kayaçların yüzey pürüzlülükleri ince aşındırıcı ile artmıştır (Şekil 3.25). Genel olarak ince boyutlu aşındırıcı partikülleri, boyutları nedeniyle malzeme üzerinde belirli bir noktada iri boyutlu aşındırıcı partiküllerine göre daha fazla yer kaplarlar. Başka bir deyişle birim kareye düşen aşındırıcı

partikül sayısı fazla olmasına rağmen etkilediği alan iri boyutlu aşındırıcıya göre daha azdır. Buda aşındırıcı partiküllerin malzeme üzerinde daha az tahribata yol açmasına neden olur.



Şekil 3.25. Örnek yüzey pürüzlülüklerinin çalışma basıncına bağlı değişimi

Küleççi ve Akkurt (2001), malzeme yüzey pürüzlülüklerinin ölçüldüğü kesme aşınma bölgesi derinliklerinin, iri aşındırıcı ile daha fazla olduğunu, buna rağmen bu bölgede yüksek pürüzlülük değerlerinin elde edildiğini ifade etmişlerdir. Bu durumda beklenen, ince boyutlu aşındırıcı ile daha düşük pürüzlülüklerin elde edilmesidir. Ancak, kesilen malzemenin özelliklerinin de elde edilen pürüzlülük değerlerini etkilediği dikkate alındığında bu çalışmada elde edilen sonuçların ortaya çıkması beklenilebilir.

3.1.5.6. Varyans Analizi

Çalışma basıncı, meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı besleme miktarı parametreleri Baltic Brown yüzey pürüzlülüğü için istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleridir. Bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranları ise % 48,59 ile çalışma basıncı, % 36,79 ile meme-örnek mesafesi ve % 9,27 ile aşındırıcı besleme miktarıdır. Carmen Red için yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi, çalışma basıncı, kesme hızı ve aşındırıcı boyutudur. Anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin katkı oranları ise % 40,31 meme-örnek mesafesi, % 25,13 ile çalışma basıncı, % 19,9 ile kesme hızı ve % 4,71

ile aşındırıcı boyutudur. Rosa Minho için yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri çalışma basıncı, meme-örnek mesafesi, aşındırıcı besleme miktarı ve kesme hızı olarak belirlenmiştir. Parametrelerinin katkı oranları da % 48,45 ile çalışma basıncı, % 33,16 ile meme-örnek mesafesi, % 12,95 ile aşındırıcı besleme miktarı ve % 4,67 ile kesme hızıdır (Ek Tablo 5).

Baltic Brown, Carmen Red Rosa Minho'da çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Baltic Brown:

$$YP = 4,97 + 0,0810xT - 0,0840xM + 0,106xD + 0,267xP - 0,050xS, \quad R^2 = \% 53,7 \quad (3.37)$$

Carmen Red:

$$YP = 6,35 - 0,0053xT - 0,0033xM - 0,163xD + 0,118xP - 0,156xS, \quad R^2 = \% 56,4 \quad (3.38)$$

Rosa Minho:

$$YP = 5,02 + 0,0952xT - 0,127xM + 0,106xD + 0,277xP - 0,041xS, \quad R^2 = \% 58,5 \quad (3.39)$$

Azul Platino için yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri meme-örnek mesafesi, aşındırıcı boyutu, kesme hızı ve çalışma basıncıdır. Bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranları ise % 39,41 ile meme-örnek mesafesi, % 10,07 ile aşındırıcı boyutu, % 25,94 ile kesme hızı ve % 17,09 ile çalışma basıncıdır. Giresun Vizon için yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkin çalışma parametreleri % 43,53 katkı oranı ile çalışma basıncı ve % 26,22 katkı oranı ile kesme hızı olarak bulunmuştur. Aksaray Yaylak için etkin çalışma parametreleri çalışma basıncı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı boyutudur.

Etkin çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranları ise % 50,84 ile çalışma basıncı, % 31,05 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 11,2 ile meme-örnek mesafesi ve % 3,45 ile aşındırıcı boyutudur.

Azul Platino, Giresun Vizon ve Aksaray Yaylak'ta çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Azul Platino:

$$YP = 5,89 + 0,0707xT - 0,159xM + 0,157xD + 0,0723xP + 0,036xS, \quad R^2 = \% 62,2 \quad (3.40)$$

Giresun Vizon:

$$YP = 5,70 + 0,105xT - 0,0088xM + 0,145xD + 0,0963xP - 0,194xS, \quad R^2 = \% 76,2 \quad (3.41)$$

Aksaray Yaylak:

$$YP = 5,74 + 0,0652xT - 0,106xM + 0,0998xD + 0,108xP + 0,16xS, \quad R^2 = \% 67,5 \quad (3.42)$$

Multicolor Red için yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip çalışma parametreleri aşındırıcı besleme miktarı, çalışma basıncı ve meme-örnek mesafesidir. Anlamlı etkiye sahip çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranları ise % 51,10 ile aşındırıcı besleme miktarı, % 20,55 ile çalışma basıncı ve % 18,44 ile meme-örnek mesafesidir.

Balaban Green için yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkin çalışma parametreleri aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi ve çalışma basıncıdır. Etkin olan çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki katkı oranları ise % 50,50 ile aşındırıcı besleme miktarı, %19,47 ile meme-örnek mesafesi ve % 18,31 ile çalışma basıncı olarak belirlenmiştir. Bergama Grey için ise etken çalışma parametresi yalnızca aşındırıcı besleme miktarıdır ve bu parametrenin katkı oranı % 48,48'dir.

Multicolor Red, Balaban Green ve Bergama Grey'de çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ile ilişkisini ifade eden regresyon modelleri aşağıda verilmektedir.

Multicolor Red:

$$YP = 5,50 + 0,328xT - 0,189xM + 0,258xD - 0,117xP + 0,236xS, \quad R^2 = \% 57,7 \quad (3.43)$$

Balaban Green:

$$YP = 5,17 + 0,0940xT + 0,232xM + 0,100xD - 0,0025xP + 0,020xS, \quad R^2 = \% 63,1 \quad (3.44)$$

Bergama Grey:

$$YP = 6,78 + 0,166xT - 0,030xM + 0,105xD + 0,041xP - 0,174xS, \quad R^2 = \% 53,8 \quad (3.45)$$

3.2. Kayaç Dokusal Özelliklerin Kesme Performansı Üzerindeki Etkisi

Kayacı oluşturan minerallerin boyutu, şekli ve uzaydaki dağılımı ile fiziksel ve mekanik özellikleri, granit gibi taneli kayaçların malzeme ve dokusal özellikleri olarak tanımlanabilir. Bu tür kayaçların maruz kaldıkları (kesme gibi) herhangi bir mekanik etkiye verdikleri tepki, kayaç malzeme ve dokusal özellikleri tarafından etkilenir. Tane boyu dağılımı farklı dokuz kayacın aşındırıcı su jeti ile kesildiği ve kayaç dokusal özelliklerinin kesmeye etkisinin araştırıldığı bu çalışmada, kayaç dokusal özellikleri ile

kesme performansı arasında kuvvetli ilişkiler tespit edilmiştir. Bu ilişkiler için aşağıda sıralanan malzeme özellikleri temel alınmıştır.

- i) Taneler arası sınır ve tanelerin yerleşimi,
- ii) Kayaç ortalama tane boyutu,
- iii) Kayaç ortalama mikrosertliği,
- iv) Tek eksenli basma dayanımı,

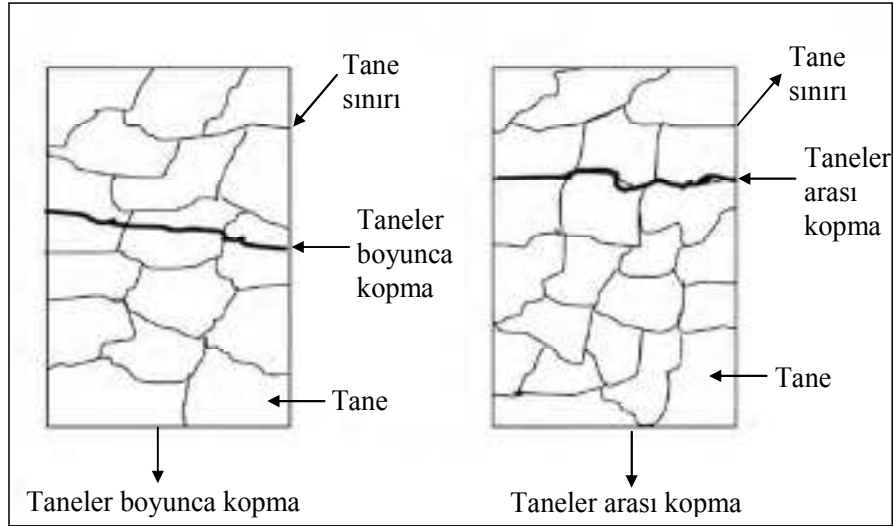
Deney sonuçları incelendiğinde; en yüksek kesme derinliklerin ince taneli kayalarda, en düşük kesme derinliklerinin ise iri taneli kayalarda elde edildiği gözlenmiştir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1. Kayalarda elde edilen ortalama kesme performans değerleri

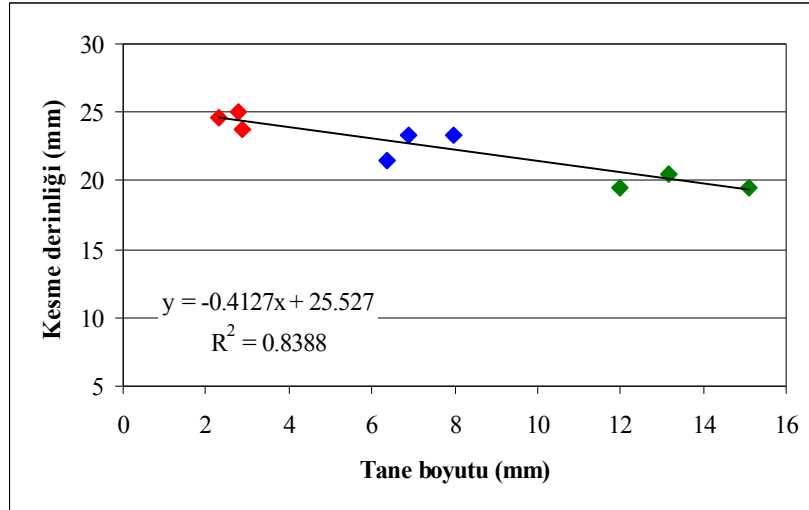
Kayaç	Kesme derinliği (mm)	Kesme aşınma bölgesi (mm)	Kesme genişliği (mm)	Kerf açısı (derece)	Yüzey pürüzlülüğü (μm)
Rosa Minho	20,45	9,92	2,89	11,80	5,84
Baltic Brown	19,52	9,79	2,57	12,87	5,78
Carmen Red	19,56	10,13	2,44	10,22	5,98
Giresun Vizon	23,31	12,25	1,60	7,3	6,26
Aksaray Yaylak	21,43	11,89	1,60	8,21	6,40
Azul Platino	23,33	13,30	1,64	6,05	6,29
Balaban Green	23,75	13,21	1,65	6,24	6,26
Multicolor Red	24,63	16,17	1,63	6,63	6,55
Bergama Grey	25,09	16,49	1,55	5,24	6,67

Kayacı oluşturan minerallerin tane boyutunun küçük olması, kayacın çok sayıda taneye sahip olduğu anlamına gelir. Bu, aynı zamanda jet içerisindeki aşındırıcı partiküllerinin kesmesi/geçmesi gereken taneler arası sınırın da fazla olması demektir. Omar vd. (2010), granit gibi taneli kayalarda kırılma ya da kesilme iki farklı şekilde meydana geldiğini ifade etmiştir. Bunlardan birincisi taneler arası kırılma/kesilme, ikincisi

ise taneler boyunca kırılma/kesilme şeklindedir (Şekil 3.26). Ehlen (2002) ise taneli kayalarda kırılma ya da kesilmenin taneler arası kopmayla başladığı bunu takiben taneler boyunca kırılmaların/kesilmelerin meydana geldiğini ifade etmiştir. Bu çalışmada elde edilen kesme derinlikleri ile ortalama kayaç tane boyutu arasındaki ilişki, yukarıdaki ifadeyi destekler niteliktedir (Şekil 3.27).

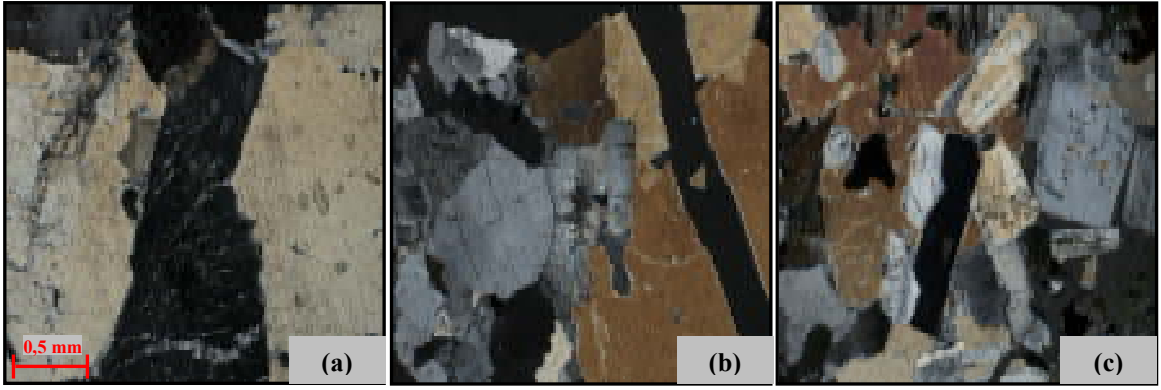


Şekil 3.26. Taneli kayalarda kırılma/kesilme oluşumu (Omar vd, 2010)



Şekil 3.27. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Bilindiği gibi iri taneli kayalarda ince taneli kayalara oranla belirli bir alanda daha az mineral bulunur (Şekil 3.28'deki incekesit görüntülerinde gösterildiği gibi). İri taneli kayalarda az sayıda mineral bulunması, taneler arası sınırın da az olması anlamına gelir. Böylelikle iri taneli bir kayada kayacın kesilmesi anında jet-aşındırıcı karışımı, kayacın kesilmesi için daha çok taneler boyunca nüfuz etmek zorunda kalır. Taneli kayalarda kopmanın/kesilmenin tane sınırlarından daha kolay gerçekleştiği göz önüne alındığında, iri taneli kayalarda daha düşük kesme derinliklerinin elde edilmesi söz konusu olabilir.



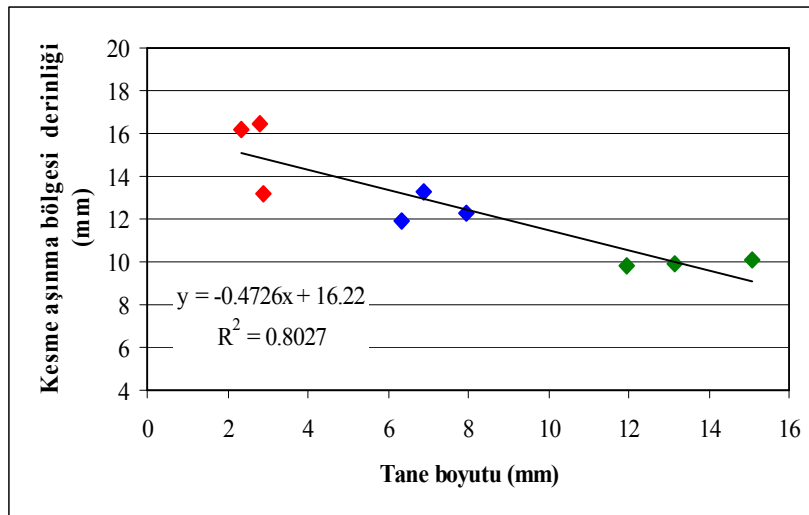
Şekil 3.28. Çalışılan kayalara ait ince kesit görüntüleri a) iri taneli kay, b) orta taneli kay, c) ince taneli kay

Örneklerin kesme derinlikleri incelendiğinde (Tablo 3.1) bazı kayalarda elde edilen kesme derinliklerinin hemen hemen aynı ya da birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun kuvvetle muhtemel sebepleri arasında, kesme hattı boyunca mineral tane gruplarının yerleşim şekli sayılabilir. Şöyle ki; kesme hattına paralel yerleşim gösteren tanelerde az sayıda taneler arası sınır olacaktır. Buna bağlı olarak su jeti sürekli taneler boyunca kesim yapmak zorunda kalacaktır. Ehlen (2010)'nin belirttiği gibi taneler arası kopma/kesilme, taneler boyunca kesilme/kopmadan/kesilmeden daha kolaydır. Bu nedenle kayalarda elde edilen kesme derinliği değerlerinin birbirine yakın ya da hemen hemen aynı olması tane yerleşiminden dolayı beklenilebilir bir sonuçtur.

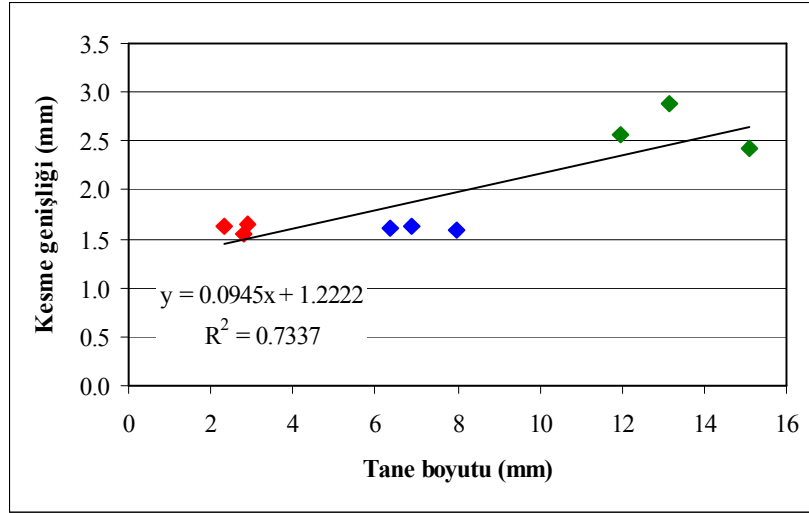
Örnek tane boyu ile kesme derinliği arasındaki benzer bir ilişki, tane boyu ile kesme aşınma bölgesi derinlikleri arasında da tespit edilmiştir (Şekil 3.29). İri taneli kayalarda jet-aşındırıcı karışımının tane boyunca kesme yapma olanağı ince taneli kayalara oranla daha yüksektir. Taneler arası geçiş sayısı, yani, geçilecek sınır sayısı daha azdır. Dolayısıyla, taneler arası kopmanın ya da kesilmenin gerçekleşme olanağı düşük

olacaktır. Bu nedenle iri taneli örneklerde kesme derinlikleri ile paralel olarak daha düşük kesme aşınma bölgesi derinlikleri elde edilmiştir.

Şekil 3.30'da, örnek kesme genişlikleri ile kayaç tane boyutu arasındaki ilişki gösterilmektedir. Tane boyutu ve dizilim şekillerinin ana etken olduğu bu durum için ayrıca kontrol faktörlerinin etkisinin de olduğu söylenebilir. İnce taneli kayaçlarda, jet/aşındırıcı karışımı kesme hattı boyunca iri taneli kayaçlara oranla daha fazla mineral ya da mineral grubuna etki etmek zorunda kalacaktır. Bu da daha fazla sayıda tane sınırı ile karşılaşılması anlamına gelir. Her bir mineralin jete karşı verdiği tepki farklıdır ancak buna rağmen taneler arası sınırın fazla olması, tek bir mineral boyunca jetin alacağı mesafenin az olması anlamına gelecektir. Böylelikle, mineral tanesinin düzensiz kesilmesi bir sonraki tane sınırı ve/veya mineral tarafından giderilebilecektir. Ayrıca, aynı meme-örnek mesafesinin seçildiği farklı tane boyutlarında malzemeler düşünüldüğünde, aşındırıcı taneler sabit bir saçılma karakteristiği göstereceğinden temas ettikleri mineralin tane boyutunun artmasıyla birlikte daha geniş bir alanda etki yapmış olurlar. Aşındırıcı-kayaç tane boyutları arasındaki ilişkiye de bağlı olarak saçılan aşındırıcı tanecikleri temas ettikleri mineralleri kesme, aşındırma, çatlatma/zayıflatma ya da koparma şekillerinden birisi/bir kaçı ile deforme ederler. Bundan dolayı, ince taneli kayaçlarda daha az kesme genişliklerinin oluşması söz konusu olabilecektir.

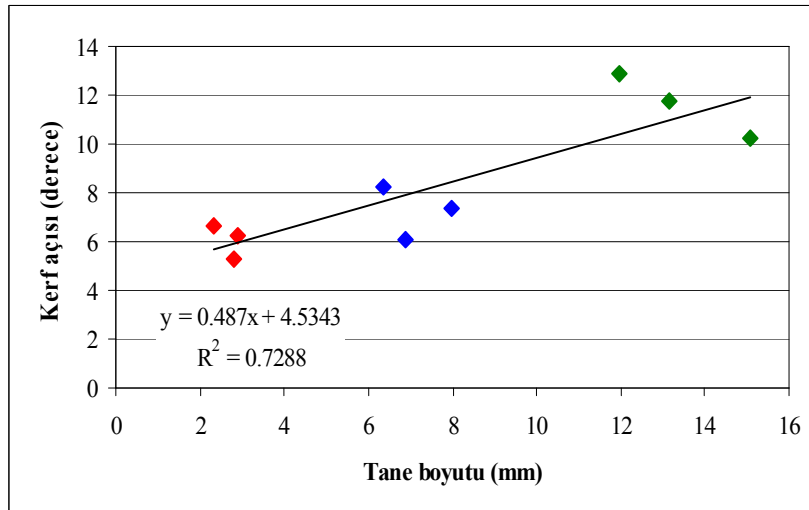


Şekil 3.29. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)



Şekil 3.30. Ortalama kayaç tane boyutu-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

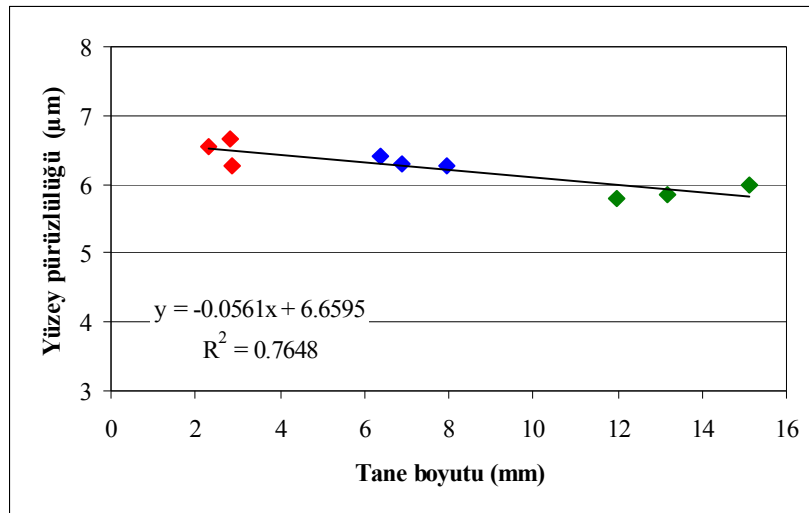
Gerek kontrol faktörlerinin etkisi gerekse kayaçların genel değerlendirmeleri incelendiğinde (Tablo 3.1), kayaç tane boyutunun artışı ile elde edilen kerf (yarık) açısının arttığı gözlenmiştir. Kayaç tane boyutunun kerf açıları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu Şekil 3.31’de de görülmektedir.



Şekil 3.31. Ortalama kayaç tane boyutu-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

İri taneli kayaçlarda alt ve üst yarık genişliği arasındaki farkın ince taneli kayaçlardakine oranla daha düşük olduğu görülmüştür. İri taneli kayaçlarda taneler arası sınır sayısının az olması, jet-aşındırıcı karışımının tane ya da taneler boyunca kesme yapmasına neden olur. Kesme süresince bir veya birkaç taneye nüfuz eden su jeti, az sayıda taneyle temas etmiş olduğu için daha düzenli bir kesme yapar. Dolayısıyla alt ve üst yarık arasında daha düşük bir fark oluşur. Bağlı olarak kerf açıları düşecektir. Oysa daha ince taneli kayaçlarda su-aşındırıcı karışımının birçok mineral ya da mineral grubunu geçmek zorunda kalır. Her bir mineralin verdiği tepkinin farklılığı ve taneler arası sınırın fazla olduğu dikkate alındığında alt ve üst yarık genişlikleri arasındaki farkın tane boyut ve diziliminden daha çok etkilenmesi beklenir. Dolayısıyla ince taneli kayaçlarda düşük yarık açıları elde edilebilir.

Örnek yüzey pürüzlülüklerinin de kayaçları oluşturan mineral tane boyutu ve diziliminden etkilendiği gözlenmiştir (Şekil 3.32). Örneklerin yüzey pürüzlülükleri, kesme aşınma bölgelerinden örnek genişliği boyunca en az üç farklı yerden ölçülmüştür. Pürüzlülük ölçümleri için kullanılan cihaz, pik noktalarını ölçme prensibiyle çalışır. Ölçümü yapan probun her bir ölçümde ileri geri hareketinin mesafesi ve değişik minerallerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin/davranışlarının (kırılganlık, mikrosertlik vb.) farklılığı da elde edilen pürüzlülük değeri üzerinde etkilidir. Dolayısıyla ölçüm hattında elde edilen pürüzlülük değerleri, hem tane ya da taneler boyunca elde edilen değerler hem de taneler arası sınırdan elde edilen değerleri içermektedir.



Şekil 3.32. Ortalama kayaç tane boyutu-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Ölçüm yapılan bölgelere simetrik yüzeylerden alınan örneklerin ince kesit görüntüleri de bunu destekler niteliktedir. Bu görüntülere ait bir örnek Şekil 3.28’de verilmiştir. Şekil 3.32’den de görüleceği üzere, iri taneli kayaçlarda elde edilen pürüzlülük değerlerinin düşük ince taneli kayaçlarda elde edilen pürüzlülük değerlerinin ise yüksek olmasının temel nedeni mineral tane boyutu, dizilim şekli ve taneler arası sınır sayılabilir. Sürtünme esasına göre çalışılan pürüzlülük cihazının ucundaki iğne uçlu prob, yüzeyden aldığı ölçümleri elektrik sinyallerine çevirir. Hat boyunca aldığı ölçümlerin aritmetik ortalaması olarak Ra değerini pürüzlülük değeri olarak kaydeder. Bu iğne uçlu prob ile düz yüzeylerde ölçüm alınırken daha az pik noktası tespit edilmiştir. Buna karşın girinti/çukuntulu yüzeylerde daha fazla pik noktası olduğu görülmüştür (Şekil 3.33).

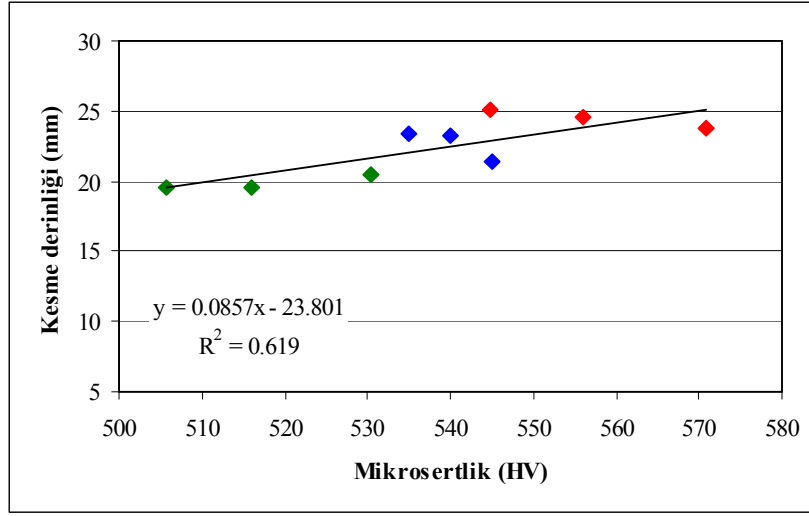


Şekil 3.33. Pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profilleri a) iri taneli kayaçlardan alınan pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profili, b) ince taneli kayaçlarda alınan pürüzlülük ölçümlerinde elde edilen yüzey profili

Farklı malzemelerde aynı mesafede hareket ederek ölçüm alan prob ince taneli kayaçlarda ölçüm yaparken ölçüm mesafesinde daha fazla sayıda mineral yüzeyinde ölçüm yapar. İri taneli kayaçlarda bu sayı düşer. Bu nedenle, ince taneli kayaçlarda iri taneli kayaçlara oranla daha yüksek pürüzlülük elde edilmiştir. Öte yandan, aynı ve/veya farklı boyuttaki kayaçlarda (özellikle orta ve iri boyutlu kayaçlarda) birbirine yakın pürüzlülük değerlerinin elde edilmesi, ölçüm hattında yer alan tanelerin dizilim şekline kaynaklandığı söylenebilir. Yani ölçüm hattına paralel yerleşen tanelerin fazla sayıda olması, bu hat

boyunca geçilecek tane sınır sayısının az olması anlamına gelir. Buda, düşük pürüzlülüklerin elde edilmesine yol açar. Aksi durumda, yani ölçüm hattı üzerinde uzun eksenleri ölçüm hattına dik yerleşmiş tanelerin fazla olması daha fazla sayıda tane sınırının geçilmesine sebep olur. Böylelikle fazla sayıda pik noktası ile karşılaşılacağından daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilir. Ayrıca çalışılan kayaçlarda bulunan kuvars genel olarak kırılğan bir yapıdadır. Bunun önemi, özellikle ince taneli kayaçlarda pik noktalarını ölçme prensibine göre çalışan cihazın pikler okuma olasılığının artmasıdır. Yani ayrı ayrı her bir ölçüm için tane boyu arttıkça bir ölçümde bir ya da az sayıda mineral yüzeyinden ölçüm alınabilirken ince taneli kayaçlarda aynı ölçümde birçok mineral yüzeyinden ölçüm yapılmaktadır. Ölçüm değerlerinin biraz da bu sebeplerden böyle çıkmasının yanı sıra pürüzlülüğün tane boyutuyla ters bir ilişkisinin olması yine aynı kayaç fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir.

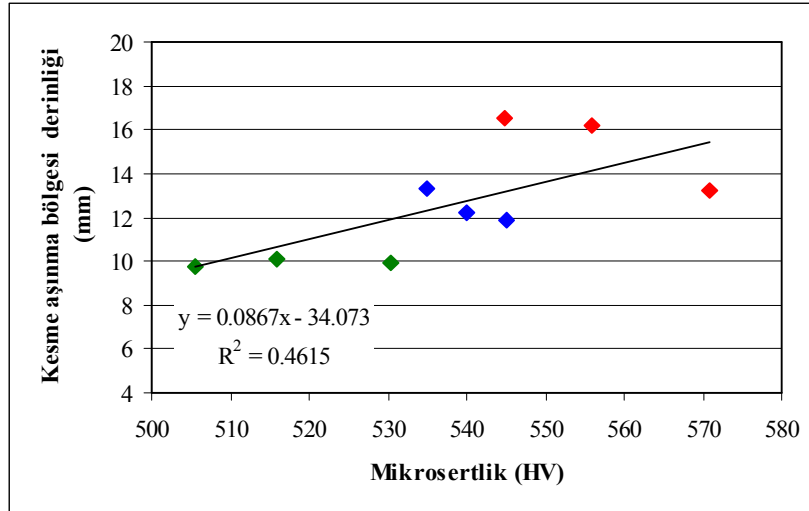
Granit gibi taneli kayaçların kesme gibi bir mekanik etkiye verdikleri tepki kayacı oluşturan bileşenlerin kontrolü altındadır. Bu bileşenlerin her birinin kendine özgü davranışları olduğu kadar birbirlerine benzer davranışları da olabilmektedir. Kayacı oluşturan minerallerin özelliklerinden biri de mikrosertlikleridir. Mikrosertlik, kayacı oluşturan her bir mineralin kristalografik olarak atomik dayanımını yansıtan ve dış etkilere gösterdiği mekanik tepkinin ölçüsü olarak tanımlanabilir (Omar vd., 2010). Başka bir deyişle, mineralin üzerine uygulanan herhangi bir kuvvete verdiği tepki, mikrosertliğini ifade eder. Granit türü kayaçların aşındırıcı su jeti ile kesilmeleri, bir anlamda, minerallerin maruz kaldığı mikro aşınma sonucu gerçekleşir. Minerallerin mikro aşınmaya gösterdikleri tepkiyi ifade eden mikro sertlik burada önemli rol oynar. Deneylerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yüksek mikrosertliğe sahip kayaçlarda yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir (Şekil 3.34). Böyle bir sonucun ortaya çıkmasında etken faktörlerin başında minerallerin kırılğanlık/çatlaklıklarının olduğu söylenebilir. Çünkü ortalama mikro sertlik değerini belirleyen her bir mineral sınıfının sertliklerinin yanı sıra minerallerin kırılğanlık özellikleridir. Ortalama mikrosertliğin artması granit içerisindeki mikrosertliği yüksek kuvars ve plajiyoklaz minerallerinin oransal olarak artış göstermesiyle mümkündür. Fakat bu artış mikrosertlik ortalamalarını yükseltirken aynı zamanda kırılğanlık özelliğini de arttırır. Minerallerin mikro sertlikleri ölçülürken karşılaşılan durumlardan bir tanesi de, ölçümler sırasında mikro sertlik değerleri 400 Vickers'ten yüksek olan minerallerde, yüksek olanlarda çatlama ve kırılmaların oluşmasıdır.



Şekil 3.34. Kayaç mikrosertliği-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Mikrosertlik cihazının seçilen 10 sn' de uyguladığı yüklemeye mineral kırılma özelliğine bağlı olarak oluşabilen kırılmalar, çatlamlar vb gibi durumların kesme işlemi boyunca devam eden anlık aşındırıcı tanecik temasıyla daha fazla olması beklenir. Yapılan kesme işlemlerinde derinlik üzerine elde edilen değerlerin mikrosertlikle doğru orantılı olmasının sebebi, aslında mikro sertliği yüksek minerallerin karşı koyabilecekleri yüklemelerin üzerindeki durumlarda (belki de sertliği düşük minerallerde olduğu gibi çökme ya da esneme gibi özellikler göstermeyerek) doğrudan kırılma eğilimi göstermelerinden kaynaklanabilmektedir. Ayrıca kayaç tane boyutunun azalması örnek mikrosertliklerinin artması sonucunu getirir. Çünkü tane boyutunun düşmesi kayacı oluşturan mineral sayısının artması anlamına gelir. Sıkı bir şekilde kenetlenen ince boyutlu mineraller kayacın maruz kalacağı tektonik, atmosferik vb dış etkilerin mineralleri zayıflatma olasılıklarını azaltır. Ancak, kayaç içerisindeki mineral sayısının artması mineral gruplarının mikrosertliğini arttırırken diğer taraftan kayaç içerisindeki taneler arası sınırın da artmasını sağlar. Bu, mineral mikro sertliklerinin yüksek olmasına karşın yüksek kesme derinlikleri elde edilmesine neden olabilecek bir etkidir. Çünkü taneli kayalarda, kırılma/kopma öncelikle taneler arası sınırlarda başlar sonra tanelerin içinde devam eder (Ehlen, 2002). Bundan dolayı, mikrosertlikleri yüksek olmasına rağmen ince taneli kayalarda iri taneli kayalara oranla daha yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir. Benzer bir durum, örnek kesme aşınma bölgesi derinliklerinde gözlenmiştir. Kesme aşınma

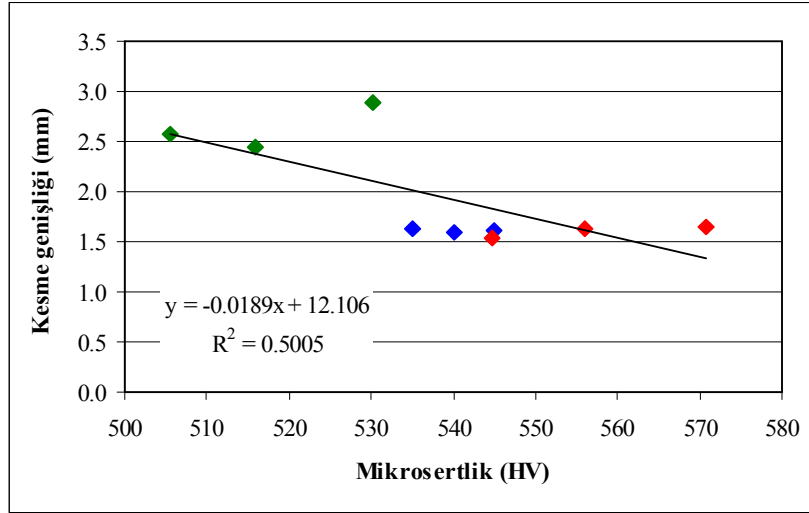
bölgesi derinlikleri, mikrosertliği yüksek olan kayalarda daha fazladır (Şekil 3.35) Ancak, kesme aşınma bölgesi derinlikleri ile mikrosertlikler arasındaki ilişki, mikrosertliklerin kesme derinlikleri ile olan ilişkileri kadar anlamlı değildir. Öte yandan; genel olarak elde edilen kesme genişlikleri incelendiğinde, düşük mikrosertlik değerlerine sahip kayalarda daha yüksek kesme genişliklerinin elde edildiği görülmüştür (Şekil 3.36). Mikrosertliği düşük kayalarda, yüksek kesme genişliklerinin elde edilmesinin sebebi kesme hattı boyunca yer alan mineral ya da minerallerin sayısı gösterilebilir. İri taneli kayalarda, kesme hattı boyunca az sayıda mineral bulunur. Bu da, jet-aşındırıcı karışımının az sayıda minerali tane boyunca kesmesi anlamına gelir. Dolayısıyla yüksek kesme genişliklerinin elde edilmesi sağlanır.



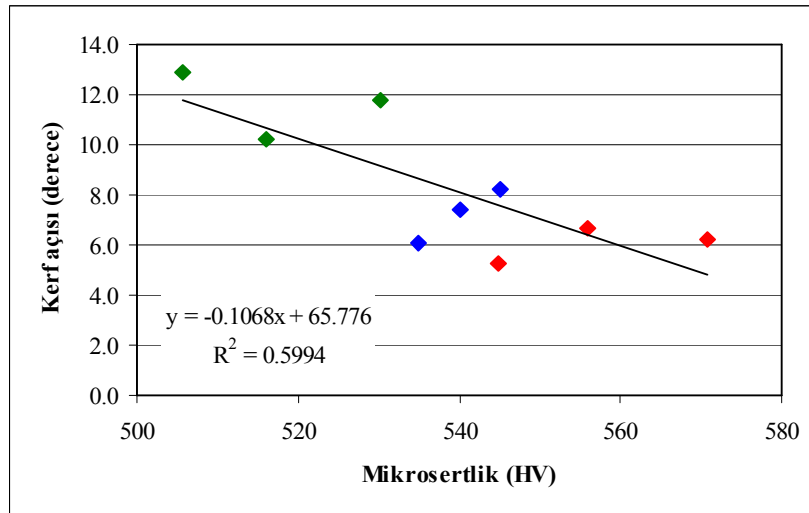
Şekil 3.35. Kayaç mikrosertliği-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Çalışılan kayalarda elde edilen kerf açıları incelendiğinde; örnek kerf açılarının, mikrosertliği düşük kayalardan mikrosertliği yüksek kayalara doğru bir düşüş içinde olduğu görülmüştür. İzleyen grafikte (Şekil 3.37), örnek kerf açıları ile mikrosertlikler arasındaki ilişki verilmiştir. Öte yandan, mikrosertliğin örnek yüzey pürüzlülükleri üzerindeki olumlu etkisi, mikrosertliği düşük kayalardan yana olmuştur. Bir başka deyişle, mikrosertliği düşük örneklerde daha pürüzsüz yüzeyler elde edilirken; yüksek mikrosertliğe sahip kayalarda daha pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Örnek yüzey pürüzlülükleri ile mikrosertlik arasındaki ilişki Şekil 3.38'de verilmektedir. Genel bir

değerlendirme yapıldığında, bu durum da kayaç içerisinde tane sayısının artışına bağlı olarak kayaç mikrosertliğinin ve bağlı olarak da kayaçtaki taneler arası sınırın artışının bir sonucu olduğu söylenebilir.



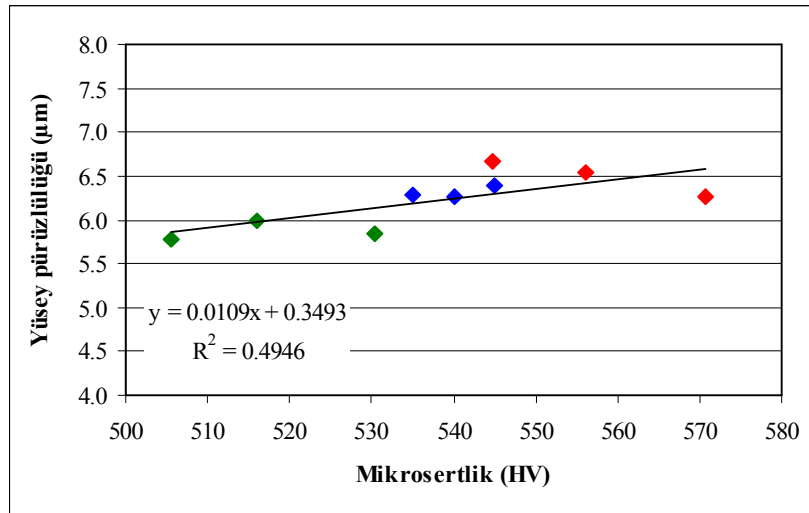
Şekil 3.36. Kayaç mikrosertliği-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)



Şekil 3.37. Kayaç mikrosertliği-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Taneler arası sınırın artması, pürüzlülük ölçümü esnasında ölçüm hattı boyunca ya da birim alana düşen pik verecek nokta sayısının artması anlamına gelir. Bu nedenle mikrosertliği yüksek olan kayaçlarda, pürüzlülük değerlerinin fazla olması beklenebilir.

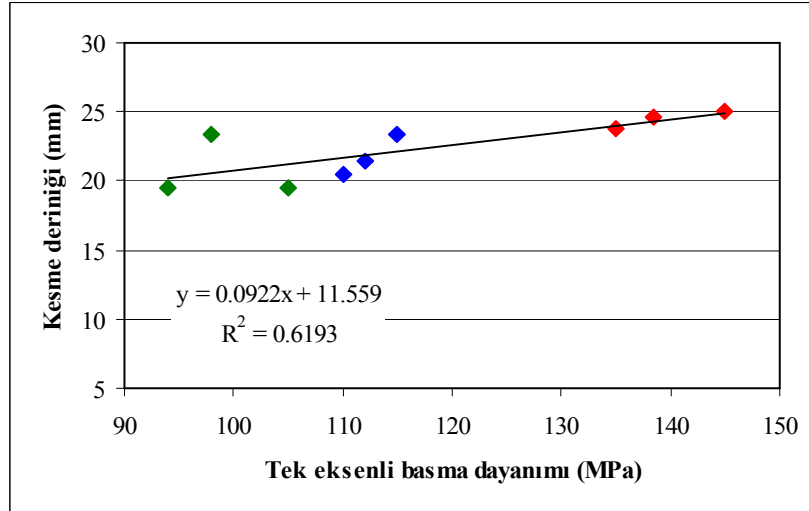
Tek eksenli basma dayanımı, kayaçların maruz bırakıldıkları basınç yüklerine gösterdikleri direnci ifade eder. Onodera ve Asoka (1980), tek eksenli basma dayanımı ile tane boyutu arasında anlamlı bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir. Araştırmacılar, kayaç içerisindeki mineral tane sayısının artması ve boyutunun küçülmesi ile kayaç dayanımının artacağını ifade etmişlerdir. İncelenen kayaçların tek eksenli basma dayanımları ile tane boyutları arasındaki ilişki, tane boyutu-basma dayanımı arasında var olduğu tespit edilen ilişkiyi doğrular niteliktedir (Tablo 2.1). Dolayısıyla, dayanımı yüksek olan kayaçların kırılmasının/kesilmesinin zor olması beklenir. Ancak aşındırıcı su jeti ile kesme bir katı-sıvı ortamında aşındırma süreci (hydro-abrasive wear process) olarak tanımlanabilecek bir süreçtir. Bu da beklenen genel mekanik davranışlarının aksine, deneylerde basma dayanımları yüksek kayaçlarda yüksek kesme derinliği elde edilmesine, düşük dayanımlı kayaçlarda kesme derinliklerinin düşük kalmasına neden olmuştur (Şekil 3.39).



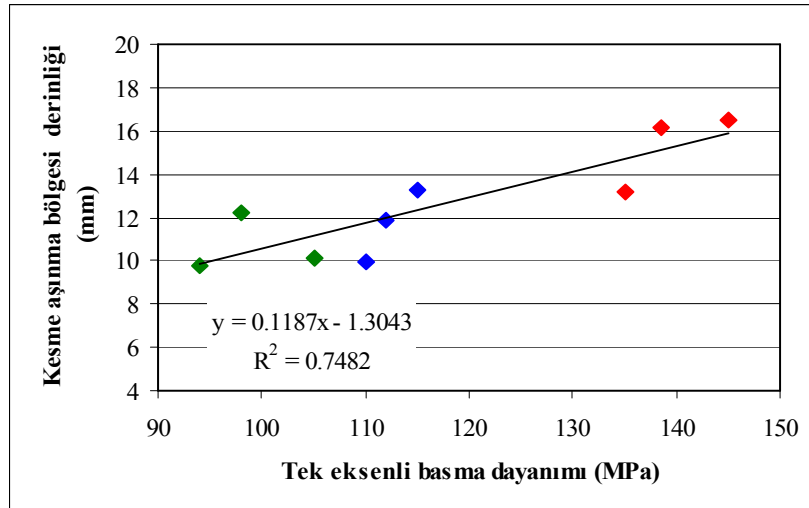
Şekil 3.38. Kayaç mikrosertliği-yüsey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Şekilde ifade edilen ilişkiyi doğuran temel etkenler olarak başlıca taneler arası sınır sayısının artışı ve kayaç bileşiminde yer alan minerallerin bünyesinde mevcut yerel zayıflıklar sayılabilir. Kayaç kesme derinliği ile basma dayanımı arasındaki ilişkinin benzeri durumu, örneklerin kesme aşınma bölgesi derinlikleri ile basma dayanımı arasında tespit edilmiştir (Şekil 3.40). Ancak buradaki anlamlılık düzeyi kesme derinliklerine göre daha yüksektir. Kesme aşınma bölgesinde gerçekleştirilen kesme sürecinde hâkim etki, doğrudan aşındırıcı taneciklerinin kinetik enerjileridir. Deformasyon aşınma bölgesinde ise

yarık tabanından dönen ya da yarık tabanına hareketlenen su-aşındırıcı karışımlarının etkileşimi sonucu oluşan bir aşındırma süreci etkendir. Dolayısıyla kesme-basma dayanımı ilişkisini en doğru ifade edebilecek süreç, kesme aşınma bölgesinde meydana gelir.



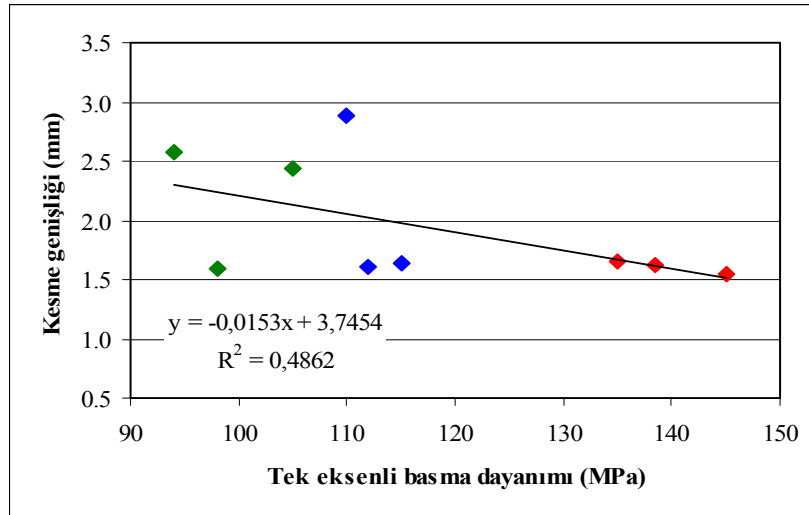
Şekil 3.39. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)



Şekil 3.40. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme aşınma bölgesi derinliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Basma dayanımı yüksek olan kayaçların kesme genişlikleri düşük olurken, düşük dayanıma sahip kayaçlarda yüksek kesme genişlikleri elde edilmiştir. İzleyen grafik, kesme

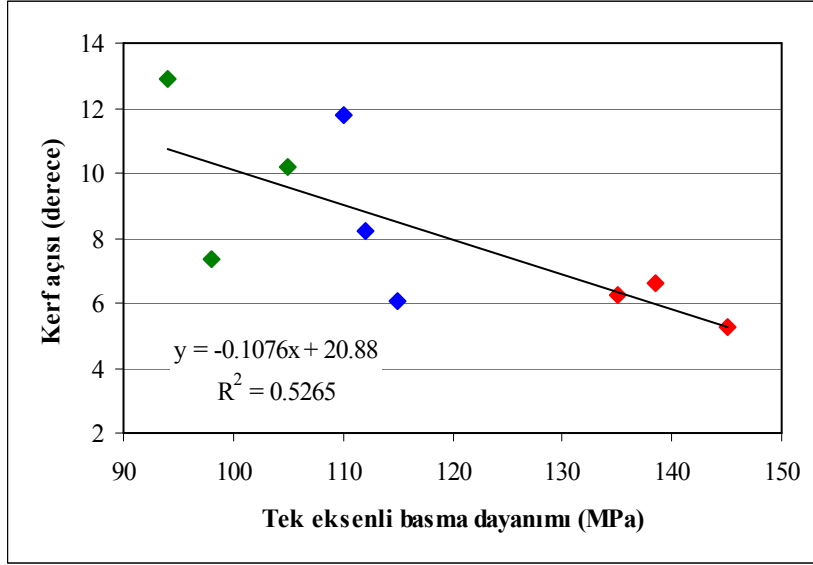
genişliği-basma dayanımı arasındaki ilişkiyi (düşük oranlarda da olsa) istatistiksel olarak desteklemektedir (Şekil 3.41). Basıncı düşük kayaçların kesme genişliklerinin yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Zira jet-aşındırıcı karışımı bu tür kayaçlarda kesme hattı boyunca neredeyse değişken olmayan mineral taneleri boyunca bir kesme yapacaktır. Buda mineral tanesinde meydana gelen düzensiz bir kesmenin düzeltilmesi için bir sonraki tane sınırı ve/veya mineral tanesinin bulunmama olasılığının yüksek olması anlamına gelir. Bir başka etkin faktör, taneciklerin açılma/yayılma sonrasında malzemeye geniş açılı temas etmeleri sonucunda kinetik enerjilerinin ancak belli bir kısmının kesmeye ayrılabilmesidir. Ayrıca az sayıda ve iri tanelerden oluştukları için tane sınırlarının deformasyona yardımcı olma etkisinden faydalanamamak olabilir.



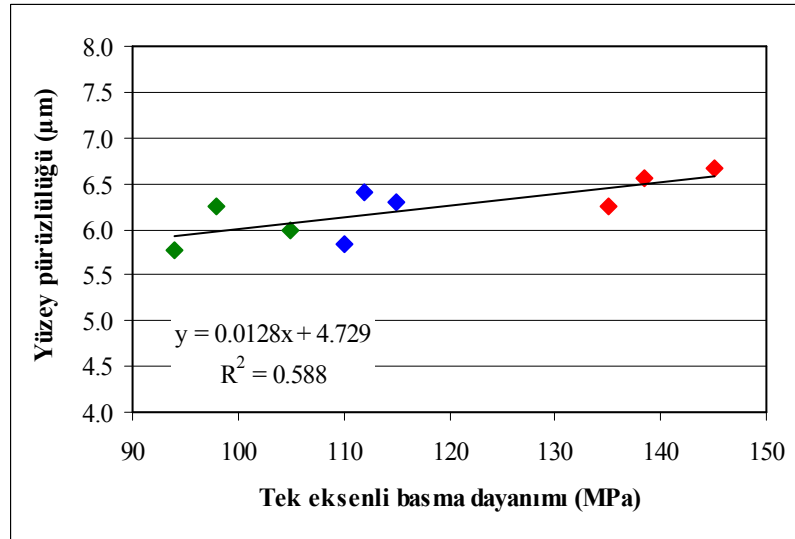
Şekil 3.41. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kesme genişliği arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Çünkü basıncı düşük örnekler nispeten daha iri taneli minerallerden oluşmuştur. Dolayısıyla da mineral karakteristikleri değişken bir yapıya sahip değildir. Tek eksenli basma dayanımları yüksek kayaçlar ise daha düşük taneli minerallerden oluşmuştur. Dolayısıyla, jet-aşındırıcı karışımı kesme hattı boyunca, karakteristikleri değişken olan çok sayıda mineral tanesine nüfuz etmek zorunda kalır. Bu da düşük kesme genişliklerinin oluşmasına yol açar. Örnek kesme genişlikleri ile basma dayanımı arasındaki ilişkiye benzer bir durum örnek kerf açıları da tespit edilmiştir. Nispeten dayanımı düşük olan kayaçlarda daha yüksek kerf açıları elde edilirken dayanımı yüksek olan kayaçlarda düşük

kerf açıları elde edilmiştir. Şekil 3.42’de örnek kerf açıları ile basma dayanımları arasındaki istatistiksel ilişki gösterilmiştir. Ayrıca, örneklerin tek eksenli basma dayanımları ile yüzey pürüzlülükleri arasında da bir ilişki tespit edilmiştir (Şekil 3.43).



Şekil 3.42. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-kerf açısı arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)



Şekil 3.43. Kayaç tek eksenli basma dayanımı-yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki (kırmızı: ince taneli kayaç, mavi: orta taneli kayaç, yeşil: iri taneli kayaç)

Tek eksenli basma dayanımı artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülükleri de artmıştır. Çalışılan kayaçlardan ince taneli olanlar yüksek basma dayanımlarına sahiptir. Yüksek basma dayanımına sahip kayaçlarda yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmesinin önemli bir nedeni de tane boyutu ile pürüzlülük ilişkisidir. Bu ilişki daha önceki bölümlerde verilmiştir.

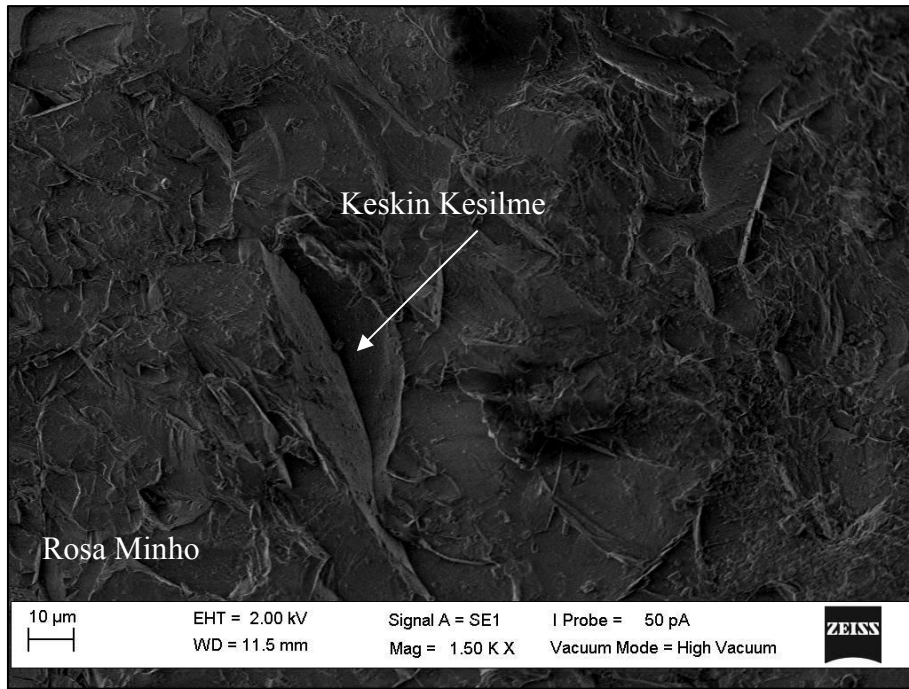
3.3. SEM Analizleri

Çalışmanın bu bölümünde her bir kayaç için kesme yüzey morfolojilerini gösteren SEM fotoğrafları çekilmiştir. Kaplama yapmaksızın görüntü alabilme özelliğine sahip olan cihazda her bir kayacın aynı deney koşullarında kesilmiş yüzeylerinden, örneğin kalınlığı boyunca (3 cm), 0,5 cm genişlik, 1 cm uzunluğunda parçalar hazırlanmıştır. Bu görüntüler üzerinden yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

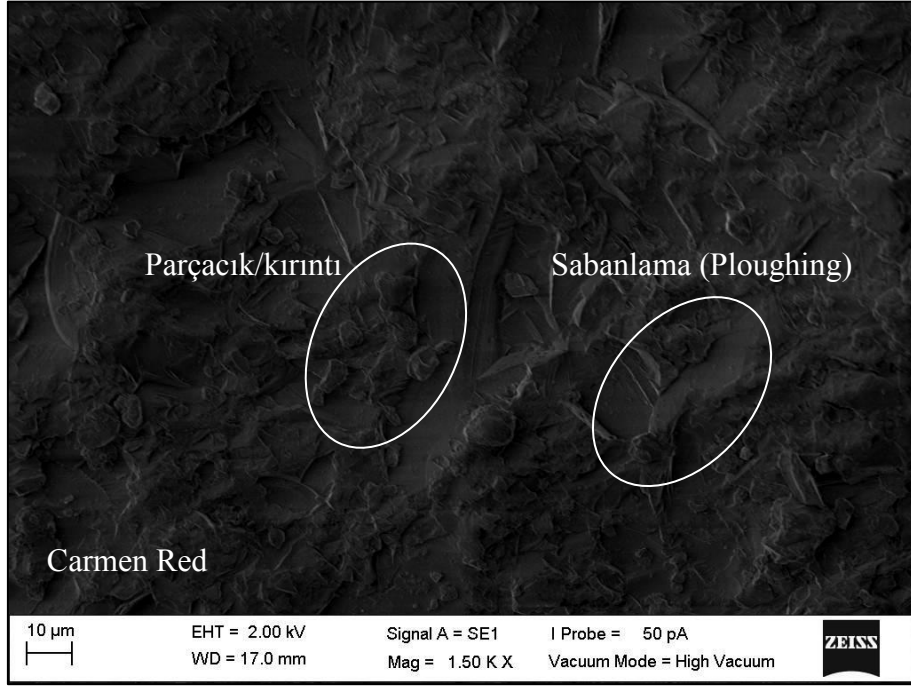
- a) Kayaçlara ait SEM görüntüleri incelendiğinde, genel olarak kesme yüzeylerinin birbirlerine benzerlik gösterdiği söylenebilir (Şekil 3.44–52). Kesme sırasında kayaç mineral tanelerinden kopan kırıntı ya da kesme yüzeyinde sıkışmış halde bulunan parçacıklar, SEM fotoğraflarında tespit edilmiştir. Bu tür parçacıklara, özellikle orta ve ince taneli kayaçların SEM görüntülerinde sıkça rastlanılmaktadır.
- b) Özellikle iri taneli kayaçlarda, keskin bir şekilde meydana gelen derin kesilmeler SEM fotoğraflarında mevcuttur (Şekil 3.44, Rosa Minho). Aşındırıcı su jeti ile kayacın kesilmesi/aşınması, jet içerisindeki aşındırıcı taneciklerin mikro-sabanlama şeklinde kesme işlevi yürütmesi ile sağlanabilir. Bu tür bir aşınmayı yâda kesilmeye gösteren morfolojik yapıyı (ploughing) SEM fotoğraflarında görmek mümkündür (Şekil 3.45-3.47-3.50).
- c) Jet-aşındırıcı karışımının karakteristik özelliklerinden biri olarak, aşındırıcı taneciklerinin kayaçtan kopardığı parçacıklar, belli bir mesafe sürüklenirler. Böylelikle, kayaç yüzeyinde sürüklenmeyle veya süpürerek (smear effect) meydana gelen bir kesme işlemi de gerçekleşebilir. Bu tür bir kesme etkisine Balaban Green'den alınan SEM fotoğrafında rastlanılmıştır (Şekil 3.52). Bahsedilen bu tür bir kesmenin bir sonucu olarak, kesme yüzeyinde akış şeklinde bir morfolojik yapı da oluşabilir.
- d) Aşındırıcı su jeti ile kesmede aktif rol alan aşındırıcı taneciklerine çok küçük boyutlarda olsalar dahi SEM görüntülerinde rastlanılabilmektedir. Mevcut

boyutundan daha küçük aşındırıcı taneciklerinin görünümü, Azul Platino (Şekil 3.49) ve Multicolor Red'in (Şekil 3.51) SEM fotoğraflarında gösterilmiştir.

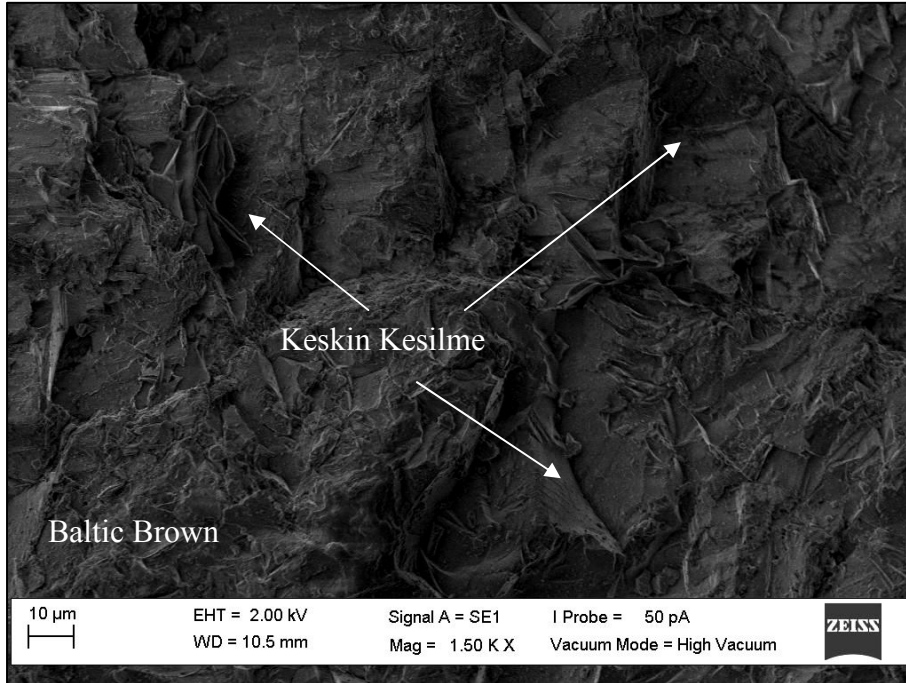
- e) Makro boyutta tane içeren granit gibi kayalarda, tanenin kendisi ya da taneler arası sınırlara mikron boyutlarında çekilen SEM fotoğraflarında rastlamak zordur. Bu tür kayaların SEM fotoğrafları ya tanenin içinden alınan görüntülerle ya da taneler arası sınırdan çekilmiş görüntülerle mümkün olabilmektedir. Düşük ihtimal dahilinde de olsa da, kayaç SEM görüntülerinde rastlanan bir diğer özellik, tane sınırı ya da taneler arası sınırdır. Bu tür bir görüntü, Azul Platino'nun SEM fotoğrafında gösterilmiştir (Şekil 3.49). Öte yandan, kesme sırasında tane sınırı ya da taneler arası sınırdan kopma ve/veya tane içerisinde meydana gelen çatlama gibi bir kesilme mekanizması da Balaban Green'in SEM fotoğrafında tespit edilmiştir (Şekil 3.52).



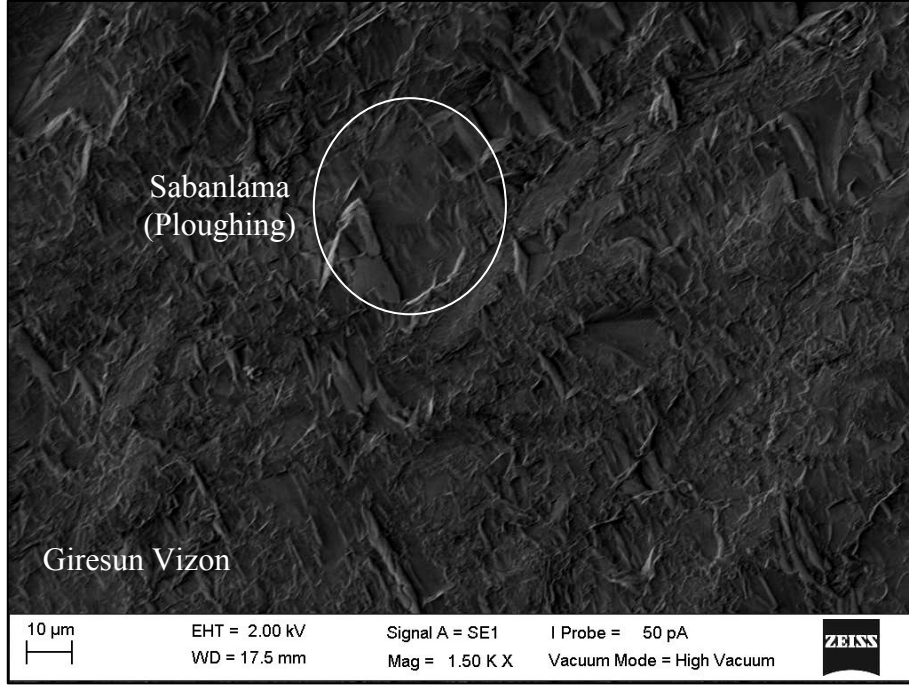
Şekil 3.44. Rosa Minho kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (derin/keskin kesilme izleri, kopan parçacıklar)



Şekil 3.45. Carmen Red kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (sabanlama (ploughing), parçacık kırıntı oluşumu)



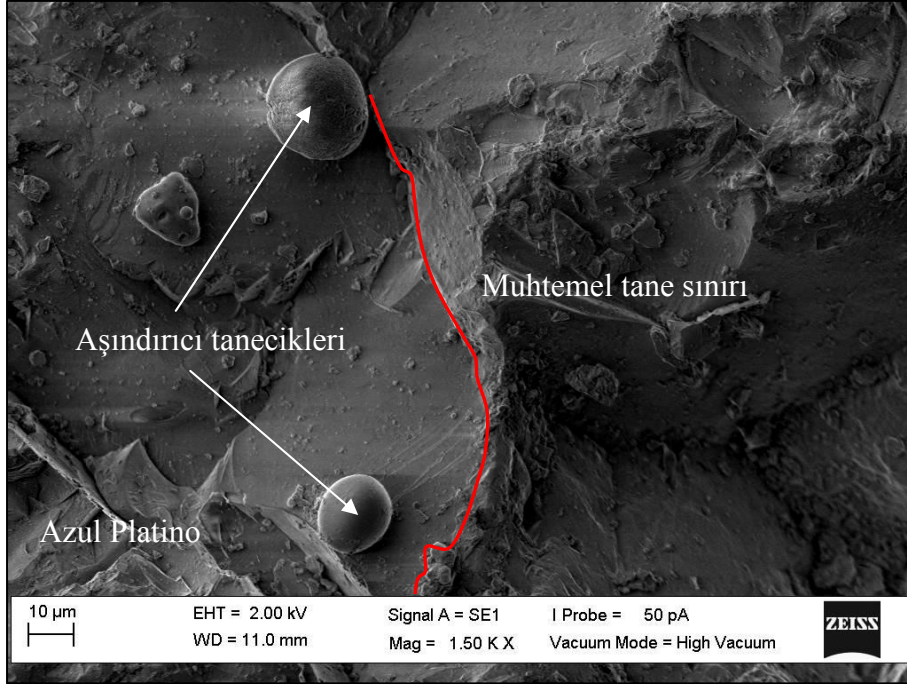
Şekil 3.46. Baltic Brown kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (derin/keskin kesilme izleri)



Şekil 3.47. Giresun Vizon kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (Sabanlama (Ploughing), akma)



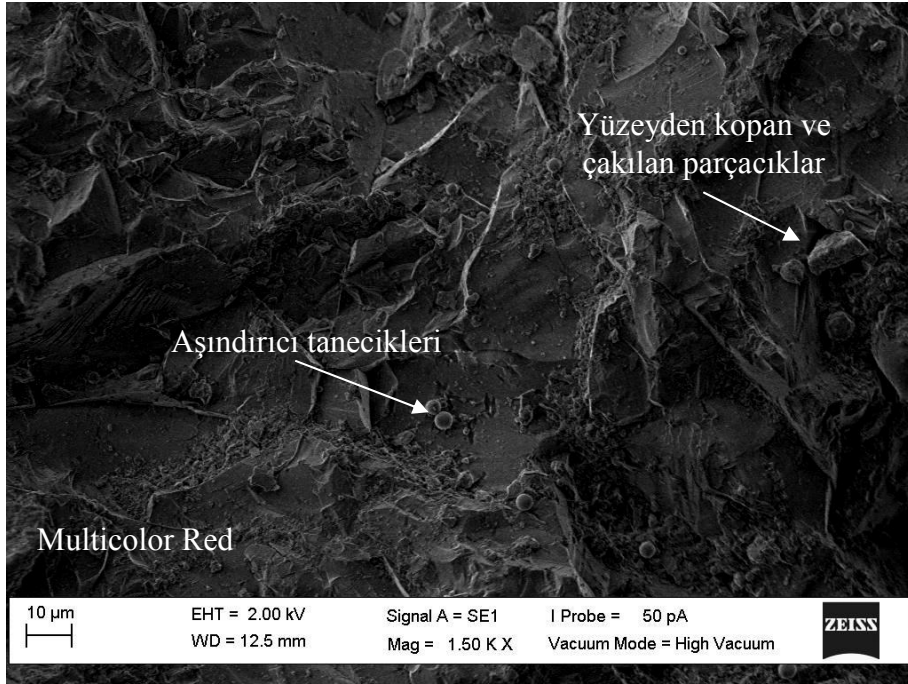
Şekil 3.48. Aksaray Yaylak kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (Kopan ve yüzeyde sıkışan parçacıkları)



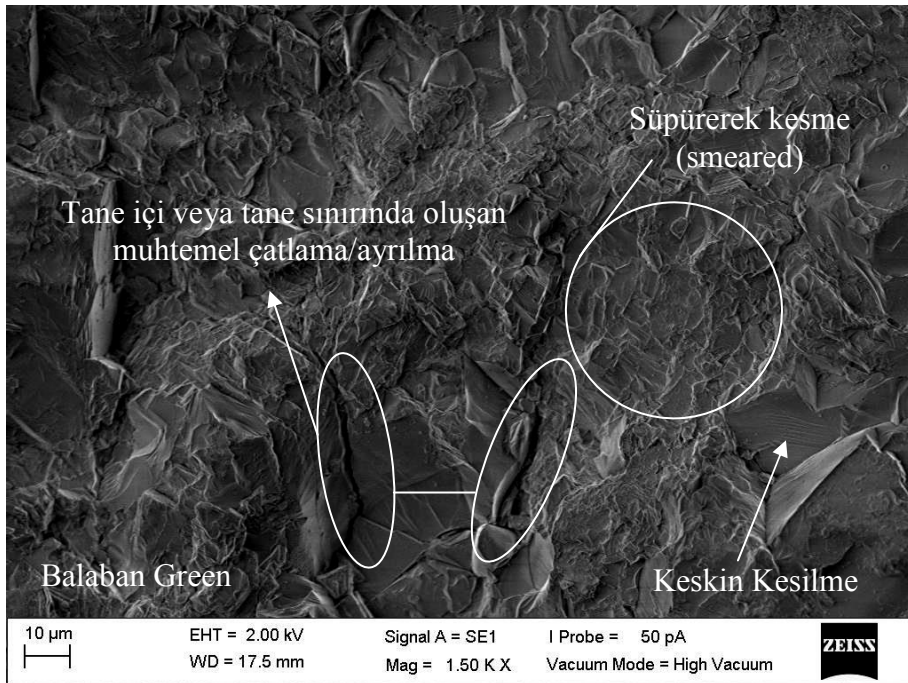
Şekil 3.49. Azul Platino kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (aşındırıcı tanecikleri, taneler arası sınırın görünümü)



Şekil 3.50. Bergama Grey kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (malzemedan kopan parçacıklar, Sabanlama (ploughing) oluşumu)



Şekil 3.51. Multicolor Red kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (malzemedan kopan ve yüzeyde sıkışan parçacıklar, aşındırıcı taneciklerinin görünümü)



Şekil 3.52. Balaban Green kesme yüzeyinde SEM görüntüsü (tane içi veya tane sınırında oluşan muhtemel çatlama/kırılma, süpürerek kesme (smeared) oluşumu, keskin/derin kesilme izleri)

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Malzemelerin kesilmesinde ve/veya işlenmesinde kullanılan yeni teknolojiler arasında, aşındırıcı su jeti kesme teknolojisi giderek kullanım alanını genişletmektedir. Doğal taşların özellikle granitin dekoratif amaçlı kesilmesi ve işlenmesinde kullanım alanı bulan su jeti teknolojisinde kesme performansı, birçok parametreye bağlıdır. Bu parametreler arasında proses parametreleri olarak, kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, meme-örnek mesafesi, çalışma basıncı, aşındırıcı tane boyu sayılabilir. Ayrıca, kesilen malzemenin özellikleri de kesme performansını etkileyen önemli bir değişkendir. Bu çalışmada aşındırıcı su jeti kayaç kesmede parametrik değişimlerin ve malzeme dokusal özelliklerinin performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar iki bölüm halinde değerlendirilmiştir. İlk bölümde, parametrik değişimlerin (kontrol faktörleri) kesme performans göstergeleri üzerindeki etkileri araştırılmış ve varyans analizleri ile proses üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahip kontrol faktörleri belirlenmiştir. İkinci bölümde ise, kayaç dokusal özellikleri ile kesme performans göstergeleri arasındaki ilişki/ilişkiler araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- i. Genel olarak; parametrik değişimlerin (malzeme farklı olmasına rağmen) performans ölçütleri üzerindeki etkileri konusunda, literatürde mevcut araştırmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir (kesme hızının artması, kesme derinliklerinin düşmesine sebep olması gibi)
- ii. Tüm kayaç örnekleri için kesme ve kesme aşınma bölgesi derinliği üzerinde istatistiksel olarak en çok anlamlı etkiye sahip parametrik değişimlerin, kesme hızı aşındırıcı boyutu olduğu tespit edilmiştir. Ancak, kesme hızı örnek kesme derinlikleri üzerinde daha çok anlamlı etkiye sahip iken aşındırıcı boyutunun örnek kesme aşınma bölgesi derinlikleri üzerindeki anlamlılık derecesi daha yüksektir. Kesme hızının ve aşındırıcı boyutunun proses üzerindeki katkı oranları ise sırasıyla %56-76 ve %40-61 aralığında olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, kayaç örnekleri için kesme genişliği ve kerf açıları üzerinde istatistiksel olarak en çok anlamlı etkiye sahip parametrik değişimin meme-örnek mesafesi olduğu tespit edilmiştir. Meme-örnek mesafesinin proses üzerindeki katkı oranı ise sırasıyla %40-77 ve %32-55 aralığında olduğu belirlenmiştir. Ek olarak, kayaç örnekleri için yüzey pürüzlülüğü üzerinde istatistiksel olarak en çok anlamlı etkiye sahip parametrik değişimlerin, aşındırıcı besleme miktarı, çalışma basıncı ve meme-örnek mesafesi olduğu tespit edilmiştir. Parametrik

değişimlerin proses üzerindeki katkı oranları is sırasıyla %50-51, %40-48 ve %22-40 arasında olduğu belirlenmiştir.

- iii. Varyans analizleri ile geliştirilen istatistiksel modellerle, kesme parametrelerine bağlı olarak performans ölçütlerinin yüksek güven aralıklarında tahmin edilebileceği görülmüştür.
- iv. Aşındırıcı su jeti ile taneli kayaçların kesilmesinde kesme işleminin, su/aşındırıcı karışımının kayacı oluşturan mineral sınırlarına girmesi ve burada oluşan erozyonla tanelerin kopup birbirinden ayırması şeklinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Ayrıca özellikle iri taneli kayaçlarda olmak üzere, su/aşındırıcı karışımının mineral tane yüzeyinden yonga koparması şeklinde de bir kesme işleminin olduğu tespit edilmiştir.
- v. Kesme performans ölçütlerinin kayaç yapıcı minerallerin dizilim şekline de önemli ölçüde etkilendiği gözlenmiştir. Örnek kesme derinlikleri, yüzey pürüzlülükleri, kesme genişlikleri ve kerf açılarının mineral tanelerinin diziliminden etkilendiği tespit edilmiştir.
- vi. Kayaçları oluşturan minerallerin tane boyutları, şekli ve dizilim şekilleri ile performans ölçütleri arasında kuvvetli ilişkiler elde edilmesine rağmen mineral bileşim oranları ile kesme performans ölçütleri arasında anlamlı ilişkiler gözlenmemiştir. Diğer taraftan, kayaç mikrosertlikleri ve tek eksenli basma dayanımları ile performans ölçütleri arasında anlamlı ilişkiler belirlenmiştir. Ancak tespit edilen bu ilişkiler yüksek korelasyon değerleri üreten ilişkiler değildir..
- vii. SEM fotoğraflarından elde edilen görüntüler üzerinden yapılan analizlerde, kayaç yüzeylerinde ağırlıklı olarak kesme (keskin kesme) izleri olduğu görülmüştür. Sabanlama şeklinde meydana gelen kesilme izleri de SEM fotoğraflarında tespit edilmiştir. Her iki deformasyon da kırılma bir malzemeye işaret etmektedir. Kesme ve sabanlama gibi deformasyonların, kayaçlar içerisinde özellikle ince taneli kayaçlarda bulunan kırılma mineraller (kuvars ve plajiyoklaz)'in yüzeyinde bulunması kuvvetli olasılıktır.Öte yandan, bazı kayaçlarda (Balaban Green gibi) gözlenen çatlakların mineral içyapısında bulunma olasılığı kadar taneler arasında bulunma olasılığı da vardır. Ancak bu çatlakların kesme sırasında ya da SEM görüntüsü alınmak üzere hazırlama işleminde oluştuğu da söylenebilir.

Konu ile ilgili çalışmalarını detaylandırmak ve daha ileri seviyelere ulaştırmak için aşağıda belirtilen konularda araştırma yapılması literatüre önemli katkılar sağlayacaktır.

- i. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneyler için Taguchi deneysel tasarım yöntemi seçilmiştir. Bu tez kapsamında olduğu gibi çalışılan malzeme özelliklerinin değişken olduğu araştırmalarda, istatistiksel deney tasarım yöntemlerinin yanı sıra klasik tasarımlarında kullanılarak sonuçların karşılaştırılabilir olarak yorumlanması faydalı olacaktır.
- ii. Sonuçların tutarlılığının artırılması bakımından gerek seçilen örnek sayısı gerekse çalışma parametreleri için daha fazla seviye/değer alınarak deneyler gerçekleştirilebilir.
- iii. Son yıllarda aşındırıcı su jeti ile farklı türden malzemelerle yapılan araştırmalarda, titreşimli meme tasarımı makinelerin malzeme yüzey kalitesini önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Ek olarak çoklu kesme yöntemi ile de malzeme yüzey kalitesinde önemli artışlar elde edilmiştir. Bundan dolayı, titreşimli meme tasarımı aşındırıcı su jeti ile yapılacak kayaç kesme işlemi konuya önemli katkılar sağlayabilecektir. Ayrıca, optimum kesme performanslarının elde edilebilmesi açısından memeden çıkan jetin, farklı açılarda malzemeye temas etmesini sağlayan tasarımlar da test edilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Abdel-Rahman, A.A. and El-Domiaty, A.A., 1998. Maximum Depth of Cut for Ceramics Using Abrasive Waterjet Technique, Wear, 218, 2, 216-222.
- Agus, M., Bortolussi, A., Ciccu, R., Imolesi, E. and Vargiu, A., 1995. Stone Cutting with Diajet, Proceedings of the 10th. International Mining Congress of Turkey, Ankara, Turkey, 29-35.
- Agus, M., Bortolussi, A., Ciccu, R., Kim, W.M. and Manca, P.P., 1993. The Influence of Rock Properties on Waterjet Performance, Proceedings of 7th. American Water jet Conference, Seattle, Washington, U.S.A., 427-442.
- Akçın, N.A., 1986. Batı Karadeniz Taşkömürü Havzasında Hidrolik Kömür Madenciliğinin Uygulanabilirliği, Türkiye 5. Kömür Kongresi, Zonguldak, Türkiye, 13-36.
- Akçın, N.A., 1987. Yüksek Basıncılı Su Jetleri ile Yapılan Kesme ve Parçalanma Çalışmaları, Madencilik, 26, 2, 27-35.
- Akkurt, A., 2004. Su Jeti ile Kesme Sistemleri ve Uygulama Alanlarının Değerlendirilmesi, Politeknik Dergisi, 7, 129-139.
- Akkurt, A., Kulekci, K., 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.
- Azmir, A.M. and Ahsan, K.A., 2009. A Study of Abrasive Waterjet Machining Process on Glass/Epoxy Composite Laminate, Journal of Materials Processing Technology, 209, 6168-6173.
- Bairu, X., Xiping, Z. and Zhixin, M., 2008. Research on One Borehole Hydraulic Coal Mining System, Earth Science Frontiers, 15, 4, 222-226.
- Bortolussi, A., Ciccu, R., Manca, P.P. and Massacci, G., 1989. Granite Quarrying with Water Jets: A Viable Technique, 5th American Water Jet Conference, Toronto, Canada, 49-58.
- Bortolussi, A., Ciccu, R., Mo-Kim, W., Manca, P.P. and Massacci, G., 1991: Jet Power Optimization in Granite Kerfing Using Oscillation Nozzles, Proceedings of the 6th. American Waterjet Conference, Houston, Texas, U.S.A., 71-85.

- Bortolussi, A., Yazici, S. and Summers, D.A., 1988. The Use of Waterjets in Cutting Granite, 9th International Symposium on Jet Cutting Technology, Sendai-Japan, 1-15.
- Canıyılmaz, E. and Kutay, F., 2003. Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Gazi Üniversitesi, 18, 3, 51-63.
- Çetin, T., 2003. Türkiye Mermer Potansiyeli, Üretimi ve İhracatı, Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi, Gazi Üniversitesi, 23, 3, 243-256.
- Chao, J., Zhou, G., Leu, M.C. and et al., 1995. Characteristics of Abrasive Waterjet Generated Surfaces and Effects of Cutting Parameters and Structure Vibration, Journal of Engineering for Industry, 117, 516-525.
- Chen, L., Siores, E. and Wong, W.C.K., 1996a. Control of the Abrasive Waterjet Cutting Process, Mechanical Engineering Transactions, 21, 61-66.
- Chen, L.; Siores, E. and Wong, W.C.K., 1996b. Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Cutting of Ceramic Materials, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36, 11, 1201-1206.
- Cui, L., An, L. and Gong, W., 2006. Effects of Process Parameters on the Comminution Capability of High Pressure Water jet Mill, Int. Journal of Mineral Processing, 81, 113–121.
- Delgado, S.N., Rodriguez-Rey, A., Suarez del Rio, L.M., Sarria, I.D, Calleja, L. and Argandona, V.G.R., 2005. The Influence of Rock Micro Hardness on the Sawability of Pink Porrino Granite (Spain), International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 42, 161–166.
- Dubugnon, O., 1981. An Experimental Study of Waterjet Assisted Drag Bit Cutting of Rocks, Proceedings of the 1st. American Waterjet Conference, Golden, Colorado, U.S.A., 83-94.
- 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.
- Ehlen, J., 2002. Some Effects of Weathering on Joints in Granitic Rocks, CATENA (Journal of Soil Science - Hydrology – Geomorphology), 49, 91-109.
- El-Domiaty, A.A., Shabara, M.A. and Abdel-Rahman, A.A., et al., 1996. On the Modelling of Abrasive Waterjet Cutting, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 12, 4, 255-265.
- Engin, İ.C., 2006. Ocak İşletmeciliğinde ve Dekoratif Mermer Üretiminde Su Jeti Kullanımı, MERSEM 2006, Maden Mühendisleri Odası, Afyonkarahisar, Türkiye, 56-61.

- Ergür, S. H., 2007. Aşındırıcı Su Jetinin Teorik Analizi ve Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Modellenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ferris, R. and Hall, T., 2004. Current Practices in Dimensional Stone Quarries Waterjets and Diamond Wire Sawing, SME Annual Meeting, Feb. 23-25, Denver, Colorado, U.S.A., 1-4.
- Foldyna, J., Sitek, L., Svehla, B. and Svehla, S., 2004. Utilization of Ultrasound to Enhance High Speed Water Jet Effect, Ultrasound Sonochemistry, 11, 131-137.
- Fowell, R.J., Anderson, I. and Waggott, A., 1988. Investigation into the Dynamic Rock Cutting Characteristics of Boom Tunneling Machines, Proceedings 29th. US Symposium Rock Mechanics, University of Minnesota, U.S.A.
- Fowler, G., Pashby, I.R. and Shipway, P.H., 2008. The Effect of Particle Hardness and Shape When Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V, Wear, 266, 613-620.
- Galecki, G. and Mazurkiewicz, M., 1989. Effectiveness of Coal Comminution by High Pressure Waterjet, 5th American Water Jet Conference, 29-31 August, Toronto, Canada, 285-297.
- Genet, M., Yan, W. and Tran-Cong, T., 2008. Investigation of a Hydraulic Impact: A Technology in Rock Breaking”, Arch Appl. Mech., 79, 825-841.
- Geren, N. ve Tunç, T., 2008. Su Jeti Kesme Sistemlerinde Kullanılan Basınç Arttırıcılarda Gerilme Analizleri ve Tasarım Sınırları, 13. Uluslar arası Makine Tasarımı ve İmalatı Kongresi, UMTİK, İstanbul-Türkiye, 609-618.
- Gudimetla, P., Wang, J. and W. Wong., 2002. Kerf Formation Analysis in the Abrasive Water Jet Cutting of Industrial Ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 128, 123-129.
- Guo, N.S., Louis, H. and Meier, G., 1993. Surface Structure and Kerf Geometry in Abrasive Waterjet Cutting, Formation and Optimization, Proceedings of 7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington, Water Jet Technology Association, St. Louis, 1-25.
- Hagan, P.C., 1992. The Cuttability of Rock Using a High Pressure Water Jet, The University of New South Wales (UNSW), Sydney, Australia.
- Hamatani, G. and Ramulu, M., 1990. Machinability of High Temperature Composites by Abrasive Waterjet, Journal of Engineering Materials and Technology, 112, 381-386.

- Handewith, H.J., Evans, R.J. and Thimons, E.D., 1985. An Overview of Water jet Assisted Rock Cutting at Pittsburg Research Center, 3rd U.S. Water Jet Conference, Pittsburg, 352-377.
- Hashish, M. and Du Plessis, M.P., 1979. Prediction Equations Relating High Velocity Jet Cutting Performance to Standoff Distance and Multipasses, Journal of Engineering for Industry, 101, 311-318.
- Hashish, M., 1984a. A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets, Journal of Engineering Materials and Technology, 106, 88-100.
- Hashish, M., 1984b. On the Modeling of Abrasive-Waterjet Cutting, Proceedings of 7th International Symposium on Jet Cutting Technology, 1984b, Ottawa, Canada, Bedford, BHR Group, 249-265.
- Hashish, M., 1988. Visualization of the Abrasive Waterjet Cutting Process, Experimental Mechanics, 28, 159-166.
- Hashish, M., 1995. Material Properties in Abrasive Waterjet Machining, Transaction of ASME, Journal of Engineering for Industry, 117, 578-583.
- Hlavac, L.M., Hlavacova, I.M., Gembalova, L., Kalicinsky, J. and Fabian, S., 2009. Experimental Method for the Investigation of the Abrasive Water Jet Cutting Quality, Int. Journal of Material Processing Technology, 20, 20, 6190-6195.
- Hood, M., Li, X., Salditt, P. and Knight, G., 1991. An Advanced System for Rock Tunnelling-Results from a Field Experiment, Proceedings 6th. American Water Jet Conference, Houston, Texas, U.S.A., 63-70.
- Hoshino, K., Nagano, T., Takagi, K., Narita, Y. and Sato, M., 1976. The Development and Experiment of the Waterjet Drill for Tunnel Construction, Proceedings of the 3rd International Symposium on Jet Cutting Technology, Chicago, U.S.A., 1-8.
- Huang, Z., Hou, C., 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.
- İMMİB., İstanbul Maden ve Metaller İhracatçı Birlikleri, Türk Doğal Taş Sektörü, 2009.
- Jianchi, Y., 1991. High Pressure Waterjets in Rock Excavation, PhD Thesis, University of Missouri-Rolla.
- Karakurt, İ., 2007. Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinin Kayaç Kesme Performanslarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

- Karakurt, İ., Aydın, K., vd., 2006. Doğal Taşların Kesilmesi ve İşlenilmesinde Su jeti Kullanımı, Ed; Demir, C. ve Yılmaz, A.O., Doğu Karadeniz Bölgesi Maden Kaynaklarının Değerlendirilmesi Sempozyumu, Trabzon, 320-326.
- Kasman, Ş., 2009. Lazer Mikro İşleme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin Deneysel Tasarım Yöntemiyle Belirlenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, Türkiye, 1-5.
- Kovacevic, R., 1991. Surface Texture in Abrasive Waterjet Cutting, Journal of manufacturing systems, 10, 1, 16-32.
- Kulaksız, S. 2005. Doğal Taş Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayını, Ankara, 634s.
- Külekçi, K. M., 2002. Process and Apparatus Developments in Industrial Waterjet Applications, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, 1297-1306.
- Külekçi, K.M. ve Akkurt, A., 2001. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesilerek Elde Edilen Yüzey Kalitesinin Değerlendirilmesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, Niğde Üniversitesi, 5(2), 13-24.
- Kuyumcu, H.Z. and Rolf, L., 2004. Application of High Pressure Waterjets for Comminution, International Journal of Mineral Processing. 74, 191-198.
- Lauand, T.C., Martin, R.G., Hennies, T.W. and Agus, M., 2001. Performance of Waterjet Cutting System in Dimension Stone, Proceedings of 11th. American Water jet Conference, Minneapolis, Minnesota, U.S.A., 427-449.
- Lemma, E., Deam, R., Chen, L. F. and Wang, J., 2005. Maximum Depth of Cut and Other Performance Characteristics of The AWJ Oscillation Cutting Process of Ductile Materials, Industrial Research Institute Swinburne, Australia.
- 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, Australia.
- Liu, Y. and Chen, X., 2004. A Study on The Abrasive Water Jet Cutting for Granite, Key Engineering Materials, 257-258, 527-532.
- Longlian, C., Ligian, A. and Gong, W., 2006. Effects of Process Parameters on Comminution Capability of High Pressure Water Jet Mill, International Journal of Mineral Processing, 81, 113-121.
- Longlian, C., Ligian, A., Gong, W. and Jiang, H., 2007. A Novel Process for Preparation of Ultra-Clean Micronized Coal by High Pressure Water jet Comminution Technique, Fuel, 86, 750-757.

- Lu, T., Yu, H., Zhou, T., Mao, J. and Guo, B., 2009. Improvement of Methane Drainage in High Gassy Coal Seam Using Waterjet Technique, International Journal of Coal Geology, 79, 40-48.
- 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.
- Magyari, A., Ilias, N., Radu, S. and Magyari, A.A., 1999. The Influence of Rocks Parameters During the Cutting Process Using high Pressure Water Jets, 10th American Waterjet Conference, Houston, Texas, U.S.A., 479-484.
- Maurer, W.C., Heilhecker, J.K. and Love W.W., 1974. High-Pressure Drilling, Proceedings of 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology, Cambridge, 80-89.
- Mendi, F. ve Külekçi, K.M., 1999. İmalatta Su Jeti Uygulamalarının Değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2-3, 1017- 1202.
- 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.
- Miranda, M.R., Lousa, P., Miranda, M.J.A. and Kim, T., 1993. Abrasive Waterjet Cutting of Portuguese Marbles, Proceedings of 7th. American Water jet Conference, Seattle, Washington, U.S.A., 443-457.
- Momber, A.W., 2004. Wear of Rocks by Water Flow, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 1, 51-68.
- Momber, A. W. and Kovacevic. R., 2000. Particle-Size Distribution Influence in High-Speed Erosion of Aluminum, Particulate Science and Technology, 18 4, 199-212.
- Momber, W.A. and Kovacevic, R., 1997. Test Parameter Analysis in Abrasive Water Jet Cutting of Rocklike Materials, International Journal of Rock Mechanic and Minerals Science, 34, 17-25.
- Momber, W.A. and Kovacevic, R., 1996. Investigation in Abrasive Waterjet Erosion Based on Wear Particle Analysis, Journal of Tribology, 118.
- Nagano, T., Hoshino, K. and Narita, Y., 1974. The Development of a Waterjet Drilling Machine, Proceedings of the 2nd. International Symposium on Jet Cutting Technology, Cambridge, U.K., 1-10.
- Nagano, T., Takagi, K., Narita, Y. and Sato, M., 1978. Development of Waterjet Drifter, Proceedings of the 4th. International Symposium on Jet Cutting Technology, Canterbury, U.K., 1-9.

- Ojmertz, K.M.C., 1993. Abrasive Waterjet Milling: An Experimental Investigation, in Proceedings of The 7th U.S. Waterjet Conference, M.Hashish (Eds.), Waterjet Technology Association, St. Louis, 777-791.
- Omar, H., Pauzi, M.I.N., Shariah, A.M. and Mail, S., 2010. Microcracks Pattern and the Degree of Weathering in Granite, <http://www.ejge.com/2009/Ppr0955/Ppr0955.pdf>, Erişim 1 Eylül 2010.
- Onodera, T.F. and Asoka, K.H.M., 1980. Relation Between Texture and Mechanical Properties of Crystalline Rocks, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol., 22, 173–177.
- Parkes, D.M. ve Fişekçi, M.Y., 1984. Hidrolik Madencilik'in Güvenirlięi, Türkiye 4. Kömür Kongresi, Zonguldak.
- Radu, M. S., Dolea, G. and Toma, G., 2006. Hard and Decorative Stones Processing with High Pressure Water Jets, The International Conference of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems, 6th Edition, Romania.
- Ramulu, M., Kunaporn, S., Arola, D., Hashish, M. and Hopkins, J., 2000. Waterjet Machining and Peening of Metals, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 122, 1, 90-95.
- Ramulu, P., and Arola, M., 1994. Predicting Hydro-abrasive Erosive Wear During Abrasive Waterjet Cutting: Part I-A Mechanistic Formulation and Its Solution, Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, 339–351.
- Savanick, A.G. and Krawza, G. W. 1996. "An Abrasive Water Jet Rock Drill", Twin Cities Research Center Bureau of Mines, U.S. Department of the Interior Minneapolis, Minnesota.
- Savanick, A.G., and Krawza, G.W., 1989. Abrasive-Enhanced Water-jet Drill for Hard Rocks, A Report of Investigations submitted to Bureau of Mines, Department of Interior of United States of America.
- 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. Journal of Material Processing Technology, 209, 3887-3893.
- Shanmugam, D.K., Wang, J. and Liu, H., 2008. Minimisation of Kerf Tapers in Abrasive Waterjet Machining of Alumina Ceramics Using a Compensation Technique, International Machine Tools&Manufacture, 48, 1527-1534.

- Srinivasu, D.S., Axinte, D.A., Shipway, P.H. and Folkes, J., 2009. Influence of Kinematic Operating Parameters on Kerf Geometry in Abrasive Waterjet Machining of Silicon Carbide Ceramics, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49, 1077-1088.
- Summers, A.D. and Peters, F.J., 1974. The Effect of Rock Anisotropy on The Excavation Rate in Barre Granite, 2nd International Symposium on Jet Cutting Technology, Cambridge, England, 1-18.
- Summers, D.A., Yao, J., Blaine, J.G., Fossey, R.G. and Tyler, L.J., 1992. Low Pressure Abrasive Waterjet Use for Precision Drilling and Cutting of Rock, <http://rockmech.mst.edu/documents/paper179.pdf>, erişim 10 Mayıs 2010.
- Taylor, C.D. and Thimmons, E.D., 1989. Water-jet-assist Improves Shearer Performance, Eng and Min J., 37-53.
- Thimons, E.D., Hauer, K.F. and Neinhaus, K., 1987. Water jet Assisted Longwall Shearer Development and Underground Test, 4th U.S. Water jet Conference, Berkeley, CA.
- URL-1., Water jet and abrasive water jet machining, <http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT%20Kharagpur/Manuf%20Proc%20II/pdf/LM-37.pdf>, erişim 19 Mayıs 2010.
- Vasek, J. and Foldyna, J., 1991. Test on Walls of a Railway Tunnel and Samples of Concrete and Blocks of Rocks with High Pressure Water Jet Equipment for Outdoor Applications in Czechoslovakia, 6th American Water Jet Conference, Houston, Texas, U.S.A., 87-100.
- Vijay, M.M. and Remisz, J., 1993. Preweakening of Hard Rocks with Waterjets. Proceedings of 7th. American Water jet Conference, Seattle, Washington, U.S.A., 405-425.
- Vikram, G. and Babu, R.N., 2002. Modelling and Analysis of Abrasive Water Jet Cut Surface Topography, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Design, Research and Application, 42, 1345-1354.
- 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., 1999. Abrasive Waterjet Machining of Polymer Matrix Composites Cutting Performance, Erosive Process and Predictive Models, Int. Journal of Adv. Manuf. Technology, 15, 757-768.
- Wang, J. and Guo, D.M., 2002. A Predictive Depth of Penetration Model for Abrasive Waterjet Cutting of Polymer Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, 121, 390-394.

- Wang, J. and Wong, W.C.K., 1999. A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39, 6, 855-870.
- Xiahong, L., Jiansheng, W., Yiyu, L., Lin, Y., Huiming, K. and Jiajun, S., 2002. Experimental Investigation of Hard Rock Cutting with Collimated Abrasive Waterjets, Int. Journal of Rock Mech. and Mining Sciences, 37, 1143-1148.
- Xie, J. and Tamaki, J., 2007. Parameterization of Micro-hardness Distribution in Granite related to Abrasive Machining Performance, Journal of Materials Processing Technology, 186, 253-258.
- Xu, J., Summers, D.A., Macneil, W. and Schmidt, M., The Use of Waterjets in the Pre-Profiling of Underground Excavation”, <http://www.umn.edu/~rockmech/faculty/papers/paper2>, erişim 2 Şubat 2009.
- 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, 208.
- Yazıcı, S. and Summers, D.A., 1989. The Investigation of Diajet (Direct Injection of Abrasive Jet) Cutting of Granite, 5th American Water Jet Conference, Toronto, Canada, 343-356.
- 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 of Polycrystalline Ceramics in Abrasive Waterjet Cutting, Wear, 193, 2, 207-217.
- Zeng, J., 1992. Mechanism of Brittle Material Erosion Associated with High Pressure AWJ Processing: A Modeling and Application Study, The University of Rhode Island.
- 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.

6. EKLER

Ek Tablo 1. Çalışma parametrelerinin kesme derinliği üzerindeki istatistiksel etkisi

	Parametre	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Oranı	Katkı (%)
Rosa Minho	T	3	344,10	114,70	20,41	64,31
	M	3	79,46	26,48	4,71	14,85
	D	3	4,03	1,34	0,24	0,75
	P	3	22,76	7,58	1,35	4,25
	S	1	73,48	73,48	13,08	13,73
	Hata	2	11,23	5,62		2,09
	Toplam	15	535,06			100
Carmen Red	T	3	352,31	117,43	18,74	64,95
	M	3	46,74	15,58	2,49	8,62
	D	3	1,53	0,51	0,08	0,28
	P	3	13,89	4,63	0,74	2,56
	S	1	115,40	115,40	18,42	21,28
	Hata	2	12,53	6,26		2,31
	Toplam	15	542,40			100
Baltic Brown	T	3	453,57	151,190	16,450	70,34
	M	3	41,74	13,914	1,510	6,47
	D	3	5,66	1,889	0,210	0,88
	P	3	28,83	9,613	1,050	4,47
	S	1	96,67	96,678	10,520	14,99
	Hata	2	18,38	9,192		2,85
	Toplam	15	644,85			100
Azul Platino	T	3	69,457	23,152	57,24	74,56
	M	3	0,580	0,193	0,48	0,62
	D	3	8,457	2,819	6,97	9,08
	P	3	13,325	4,441	10,98	14,30
	S	1	0,532	0,532	1,32	0,57
	Hata	2	0,809	0,404		0,87
	Toplam	15	93,161			100
Giresun Vizon	T	3	77,292	25,7640	58,56	76,55
	M	3	0,943	0,3145	0,71	0,93
	D	3	12,247	4,0825	9,28	12,13
	P	3	9,603	3,2009	7,28	9,51
	S	1	0,011	0,0105	0,02	0,02
	Hata	2	0,880	0,4400		0,86
	Toplam	15	100,976			100
Aksaray Yaylak	T	3	143,870	47,9567	91,87	56,46
	M	3	17,156	5,7186	10,95	6,72
	D	3	1,344	0,4479	0,86	0,53
	P	3	11,092	3,6973	7,08	4,34
	S	1	80,416	80,4161	154,05	31,54
	Hata	2	1,044	0,5220		0,41
	Toplam	15	254,922			100

Ek Tablo 1.'in devamı:

Multicolor Red	T	3	66,247	22,082	597,53	38,59
	M	3	11,851	3,950	106,89	6,90
	D	3	4,895	1,631	44,15	2,85
	P	3	36,447	12,148	328,74	21,23
	S	1	52,165	52,164	1411,52	30,39
	Hata	2	0,074	0,037		0,04
	Toplam	15	171,678			100
Balaban Green	T	3	26,340	8,780	8,64	31,36
	M	3	6,558	2,185	2,15	7,81
	D	3	2,887	0,962	0,95	3,44
	P	3	5,343	1,780	1,75	6,36
	S	1	40,832	40,832	40,19	48,61
	Hata	2	2,032	1,015	0,33	2,41
	Toplam	15	83,992			100
Bergama Grey	T	3	57,958	19,319	112,32	72,14
	M	3	2,036	0,678	3,95	2,53
	D	3	6,202	2,067	12,02	7,72
	P	3	0,170	0,057	0,33	0,22
	S	1	13,634	13,634	79,27	16,97
	Hata	2	0,344	0,172		0,43
	Toplam	15	80,346			100

T: kesme hızı, *M*: aşındırıcı besleme miktarı, *D*: meme-örnek mesafesi, *P*: çalışma basıncı, *S*: aşındırıcı boyutu

Ek Tablo 2. Çalışma parametrelerinin kesme aşınma derinliği üzerindeki istatistiksel etkisi

	Parametre	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Oranı	Katkı (%)
Rosa Minho	T	3	110,84	36,94	17,30	54,53
	M	3	37,30	12,43	5,82	18,35
	D	3	21,02	7,00	3,28	10,34
	P	3	11,09	3,69	1,73	5,46
	S	1	18,77	18,77	8,79	9,23
	Hata	2	4,27	2,13		2,10
	Toplam	15	203,25			100
Carmen Red	T	3	79,45	26,48	129,17	55,12
	M	3	16,79	5,59	27,30	11,65
	D	3	5,06	1,68	8,24	3,51
	P	3	10,46	3,48	17,02	7,26
	S	1	31,95	31,95	155,83	22,16
	Hata	2	0,41	0,20		0,28
	Toplam	15	144,12			100
Baltic Brown	T	3	77,34	25,78	23,11	61,01
	M	3	8,87	2,95	2,65	6,99
	D	3	9,08	3,02	2,71	7,16
	P	3	6,10	2,03	1,83	4,82
	S	1	23,13	23,13	20,74	18,25
	Hata	2	2,23	1,11		1,76
	Toplam	15	126,75			100
Azul Platino	T	3	14,515	4,838	32,45	27,95
	M	3	1,946	0,648	4,35	3,75
	D	3	15,361	5,120	34,34	29,58
	P	3	1,964	0,654	4,39	3,78
	S	1	17,850	17,850	119,70	34,37
	Hata	2	0,298	0,149		0,57
	Toplam	15	51,936			100
Giresun Vizon	T	3	14,612	4,870	29,66	28,03
	M	3	2,086	0,695	4,24	4,01
	D	3	15,824	5,274	32,12	30,35
	P	3	1,804	0,601	3,66	3,46
	S	1	17,472	17,472	106,41	33,52
	Hata	2	0,328	0,164		0,63
	Toplam	15	52,127			100
Aksaray Yaylak	T	3	68,197	22,732	7,47	65,09
	M	3	1,949	0,649	0,21	1,86
	D	3	5,442	1,813	0,60	5,19
	P	3	1,307	0,435	0,14	1,25
	S	1	21,786	21,785	7,16	20,80
	Hata	2	6,087	3,043		5,81
	Toplam	15	104,766			100

Ek Tablo 2.'nin devamı:

Multicolor Red	T	3	42,890	14,297	6,22	39,90
	M	3	12,642	4,214	1,83	11,76
	D	3	10,785	3,595	1,56	10,03
	P	3	3,145	1,048	0,46	2,93
	S	1	33,437	33,437	14,55	31,11
	Hata	2	4,595	2,298		4,27
	Toplam	15	107,495			100
Balaban Green	T	3	16,086	5,362	6,65	42,31
	M	3	1,528	0,509	0,63	4,03
	D	3	0,659	0,219	0,27	1,73
	P	3	1,773	0,591	0,73	4,66
	S	1	16,362	16,362	20,29	43,03
	Hata	2	1,612	0,806		4,24
	Toplam	15	38,022			100
Bergama Grey	T	3	77,101	25,700	5,31	49,21
	M	3	3,537	1,178	0,11	2,25
	D	3	3,576	1,192	0,11	2,27
	P	3	0,538	0,179	0,02	0,33
	S	1	49,667	49,667	4,47	31,70
	Hata	2	22,231	11,115		14,24
	Toplam	15	156,649			100

T: kesme hızı, *M*: aşındırıcı besleme miktarı, *D*: meme-örnek mesafesi, *P*: çalışma basıncı, *S*: aşındırıcı boyutu

Ek Tablo 3. Çalışma parametrelerinin kesme genişliği üzerindeki istatistiksel etkisi

	Parametre	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Oranı	Katkı (%)
Rosa Minho	T	3	0,50	0,16	7,19	5,60
	M	3	0,80	0,26	11,52	9,60
	D	3	6,46	2,15	92,65	77,46
	P	3	0,32	0,10	4,64	3,84
	S	1	0,22	0,22	9,70	2,64
	Hata	2	0,04	0,02		0,48
	Toplam	15	8,34			100
Carmen Red	T	3	0,39	0,13	0,54	5,61
	M	3	0,98	0,32	1,37	14,10
	D	3	4,56	1,52	6,33	65,61
	P	3	0,49	0,16	0,68	7,05
	S	1	0,05	0,05	0,22	0,72
	Hata	2	0,48	0,24		6,91
	Toplam	15	6,95			100
Baltic Brown	T	3	0,86	0,28	2,60	11,67
	M	3	1,75	0,58	5,30	23,75
	D	3	3,69	1,23	11,14	50,07
	P	3	0,43	0,14	1,31	5,83
	S	1	0,42	0,42	3,89	5,70
	Hata	2	0,22	0,11		2,98
	Toplam	15	7,37			100
Azul Platino	T	3	1,906	0,635	4,90	19,54
	M	3	2,113	0,704	5,43	21,66
	D	3	3,773	1,258	9,70	38,68
	P	3	0,657	0,219	1,69	6,75
	S	1	1,045	1,045	8,06	10,72
	Hata	2	0,259	0,129		2,65
	Toplam	15	9,755			100
Giresun Vizon	T	3	0,299	0,099	1,60	4,33
	M	3	0,657	0,219	3,51	9,51
	D	3	5,305	1,768	28,29	76,82
	P	3	0,319	0,106	1,70	4,62
	S	1	0,200	0,200	3,20	2,91
	Hata	2	0,125	0,062		1,81
	Toplam	15	6,907			100
Aksaray Yaylak	T	3	0,741	0,247	9,02	8,99
	M	3	0,681	0,227	8,29	8,25
	D	3	6,208	2,069	75,53	75,24
	P	3	0,371	0,123	4,52	4,51
	S	1	0,193	0,193	7,07	2,35
	Hata	2	0,054	0,027		0,66
	Toplam	15	8,251			100

Ek Tablo 3.'ün devamı:

Multicolor Red	T	3	0,095	0,031	2,46	22,47
	M	3	0,015	0,005	0,40	3,56
	D	3	0,161	0,053	4,15	38,07
	P	3	0,112	0,037	2,88	26,49
	S	1	0,012	0,012	0,93	2,86
	Hata	2	0,026	0,013		6,15
	Toplam	15	0,423			100
Balaban Green	T	3	0,595	0,198	2,22	24,21
	M	3	0,622	0,207	2,32	25,31
	D	3	0,340	0,113	1,27	13,83
	P	3	0,239	0,079	0,89	9,72
	S	1	0,483	0,483	5,40	19,65
	Hata	2	0,178	0,089		7,24
	Toplam	15	2,458			100
Bergama Grey	T	3	0,220	0,073	3,12	11,06
	M	3	0,126	0,042	1,78	6,33
	D	3	1,073	0,357	15,18	53,95
	P	3	0,342	0,114	4,84	17,20
	S	1	0,180	0,180	7,67	9,05
	Hata	2	0,047	0,023		2,36
	Toplam	15	1,989			100

T: kesme hızı, *M*: aşındırıcı besleme miktarı, *D*: meme-örnek mesafesi, *P*: çalışma basıncı, *S*: aşındırıcı boyutu

Ek Tablo 4. Çalışma parametrelerinin kerf açısı üzerindeki istatistiksel etkisi

	Parametre	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Oranı	Katkı (%)
Rosa Minho	T	3	7,89	2,63	1,24	4,75
	M	3	13,30	4,43	2,09	8,01
	D	3	53,67	17,89	8,44	32,31
	P	3	15,11	5,03	2,38	9,09
	S	1	71,91	71,91	33,94	43,29
	Hata	2	4,23	2,11		2,55
	Toplam	15	166,11			100
Carmen Red	T	3	66,29	22,09	8,91	37,35
	M	3	16,82	5,60	2,26	9,48
	D	3	39,27	13,09	5,28	22,12
	P	3	18,54	6,18	2,49	10,45
	S	1	31,61	31,61	12,75	17,81
	Hata	2	4,96	2,48		2,79
	Toplam	15	177,49			100
Baltic Brown	T	3	65,92	21,97	12,73	34,75
	M	3	14,75	4,91	2,85	7,77
	D	3	62,65	20,88	12,10	33,02
	P	3	20,32	6,77	3,92	10,71
	S	1	22,63	22,63	13,11	11,93
	Hata	2	3,45	1,72		1,82
	Toplam	15	189,72			100
Azul Platino	T	3	5,615	1,872	1,40	9,99
	M	3	3,041	1,014	0,76	5,41
	D	3	19,672	6,557	4,89	35,0
	P	3	15,940	5,313	3,96	28,36
	S	1	9,257	9,257	6,91	16,47
	Hata	2	2,680	1,340		4,77
	Toplam	15	56,205			100
Giresun Vizon	T	3	17,246	5,748	9,87	43,53
	M	3	4,289	1,429	2,46	10,82
	D	3	12,595	4,198	7,21	31,78
	P	3	0,961	0,320	0,55	2,43
	S	1	3,367	3,367	5,78	8,50
	Hata	2	1,164	0,582		2,94
	Toplam	15	39,626			100
Aksaray Yaylak	T	3	22,528	7,509	38,01	46,65
	M	3	14,666	4,888	24,74	30,37
	D	3	8,470	2,823	14,29	17,54
	P	3	0,630	0,210	1,06	1,31
	S	1	1,600	1,600	8,10	3,31
	Hata	2	0,395	0,197		0,82
	Toplam	15	48,290			100

Ek Tablo 4.'ün devamı:

Multicolor Red	T	3	4,345	1,448	5,84	23,24
	M	3	2,823	0,941	3,79	15,1
	D	3	4,959	1,653	6,67	26,52
	P	3	5,195	1,731	6,98	27,79
	S	1	0,878	0,878	3,54	4,70
	Hata	2	0,496	0,248		2,65
	Toplam	15	18,698			100
Balaban Green	T	3	1,532	0,510	4,55	22,59
	M	3	1,986	0,662	5,89	29,29
	D	3	2,379	0,793	7,06	35,08
	P	3	0,643	0,214	1,91	9,48
	S	1	0,016	0,016	0,14	0,24
	Hata	2	0,224	0,112		3,30
	Toplam	15	6,782			100
Bergama Grey	T	3	1,263	0,421	7,01	18,71
	M	3	1,106	0,368	6,14	16,38
	D	3	3,736	1,245	20,74	55,33
	P	3	0,452	0,150	2,51	6,70
	S	1	0,072	0,072	1,21	1,06
	Hata	2	0,120	0,060		1,78
	Toplam	15	6,752			100

T: kesme hızı, *M*: aşındırıcı besleme miktarı, *D*: meme-örnek mesafesi, *P*: çalışma basıncı, *S*: aşındırıcı boyutu

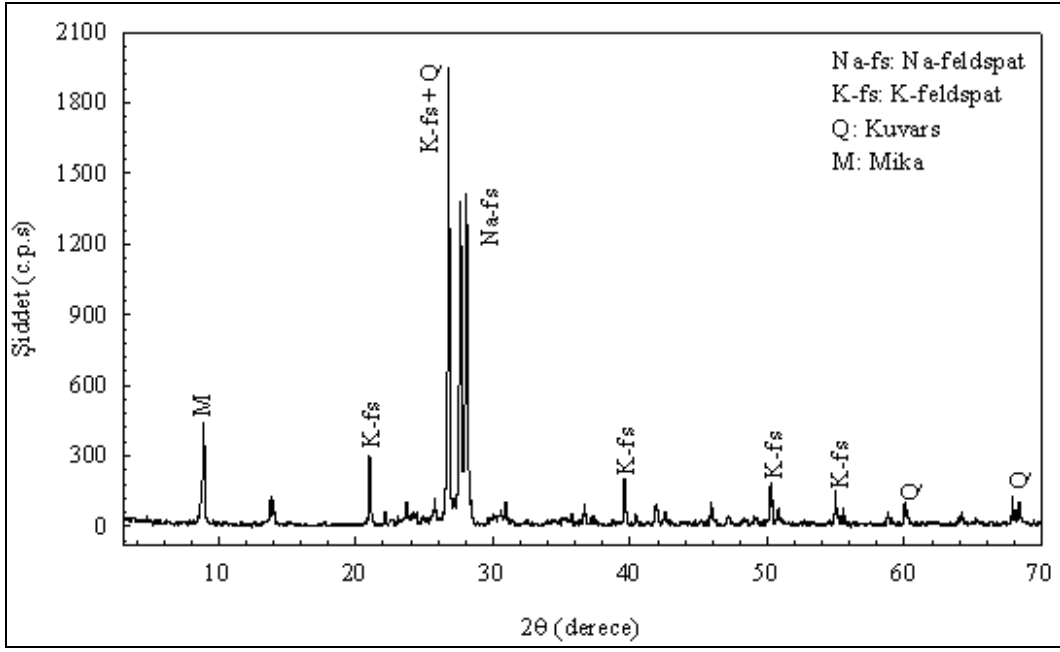
Ek Tablo 5. Çalışma parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki istatistiksel etkisi

	Parametre	Serbestleşme Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler	F Oranı	Katkı (%)
Rosa Minho	T	3	0,18	0,06	8,14	4,67
	M	3	0,50	0,16	21,92	12,95
	D	3	1,28	0,42	55,27	33,16
	P	3	1,87	0,62	80,93	48,45
	S	1	0,02	0,007	0,88	0,52
	Hata	2	0,01	0,007		0,26
	Toplam	15	3,86			100
Carmen Red	T	3	0,38	0,12	7,08	19,90
	M	3	0,16	0,05	2,96	8,38
	D	3	0,77	0,25	14,19	40,31
	P	3	0,48	0,16	8,90	25,13
	S	1	0,09	0,09	5,34	4,71
	Hata	2	0,03	0,02		1,57
	Toplam	15	1,91			100
Baltic Brown	T	3	0,16	0,05	3,79	4,49
	M	3	0,33	0,11	7,77	9,27
	D	3	1,31	0,43	30,37	36,79
	P	3	1,73	0,57	40,08	48,59
	S	1	0,01	0,01	0,69	0,28
	Hata	2	0,02	0,014		0,56
	Toplam	15	3,56			100
Azul Platino	T	3	0,428	0,142	25,97	25,94
	M	3	0,111	0,0372	3,76	6,74
	D	3	0,650	0,216	39,40	39,41
	P	3	0,282	0,094	17,08	17,09
	S	1	0,166	0,166	30,16	10,07
	Hata	2	0,011	0,005		0,68
	Toplam	15	1,650			100
Giresun Vizon	T	3	0,774	0,258	4,21	26,22
	M	3	0,065	0,021	0,36	2,21
	D	3	0,663	0,221	3,61	22,46
	P	3	1,285	0,428	6,99	43,53
	S	1	0,041	0,041	0,67	1,39
	Hata	2	0,122	0,061		4,13
	Toplam	15	2,952			100
Aksaray Yaylak	T	3	0,106	0,035	1,25	2,23
	M	3	1,475	0,491	17,34	31,05
	D	3	0,532	0,177	6,26	11,2
	P	3	2,415	0,805	28,38	50,84
	S	1	0,164	0,164	5,78	3,45
	Hata	2	0,056	0,028		1,18
	Toplam	15	4,750			100

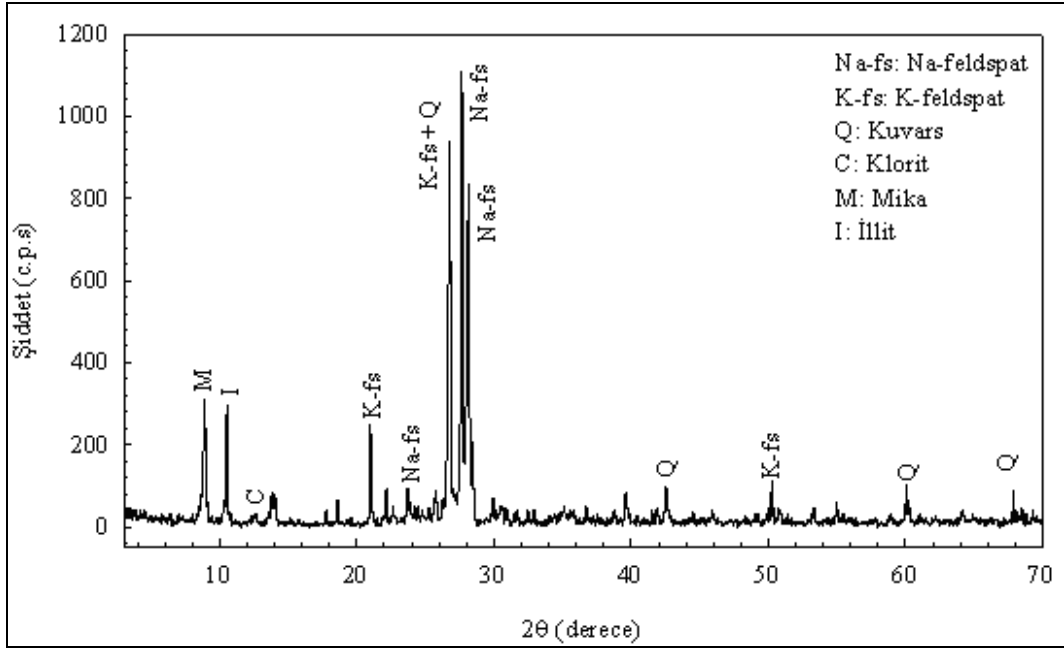
Ek Tablo 5. 'in devamı:

Multicolor Red	T	3	0,156	0,052	1,60	6,81
	M	3	1,169	0,389	11,97	51,10
	D	3	0,422	0,140	4,32	18,44
	P	3	0,470	0,156	4,81	20,55
	S	1	0,006	0,006	0,02	0,26
	Hata	2	0,065	0,033		2,84
	Toplam	15	2,288			100
Balaban Green	T	3	0,206	0,068	2,18	8,91
	M	3	1,167	0,389	12,33	50,50
	D	3	0,450	0,150	4,75	19,47
	P	3	0,423	0,141	4,47	18,31
	S	1	0,002	0,002	0,05	0,09
	Hata	2	0,063	0,031		2,72
	Toplam	15	2,311			100
Bergama Grey	T	3	0,297	0,099	2,36	11,58
	M	3	1,245	0,415	9,87	48,48
	D	3	0,469	0,156	3,72	18,26
	P	3	0,470	0,156	3,73	18,30
	S	1	0,003	0,003	0,06	0,11
	Hata	2	0,084	0,042		3,27
	Toplam	15	2,568			100

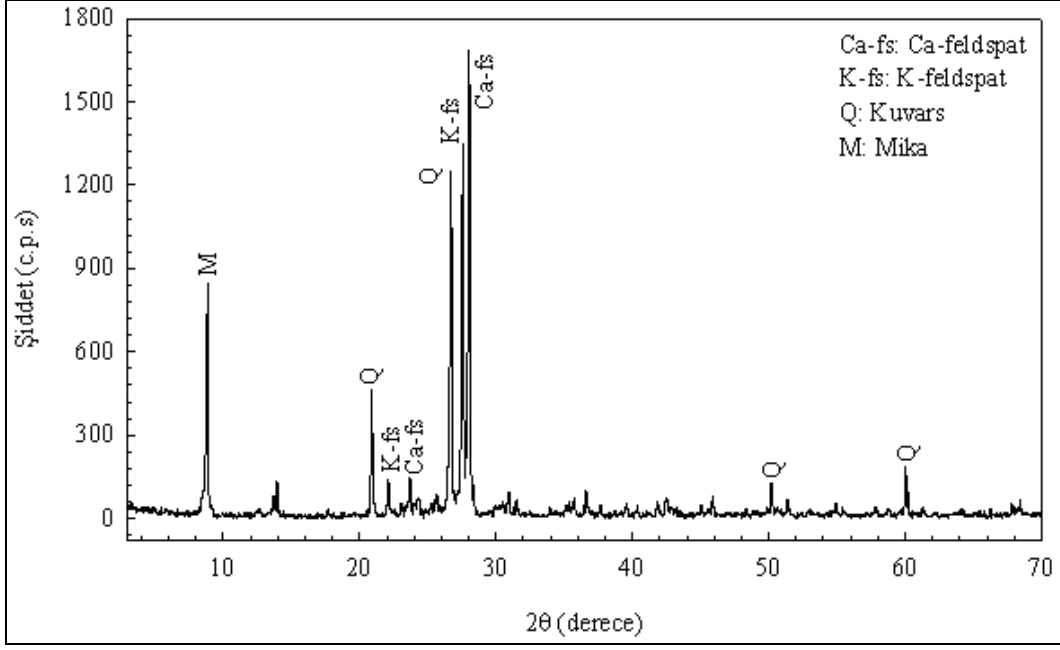
T: kesme hızı, *M*: aşındırıcı besleme miktarı, *D*: meme-örnek mesafesi, *P*: çalışma basıncı, *S*: aşındırıcı boyutu



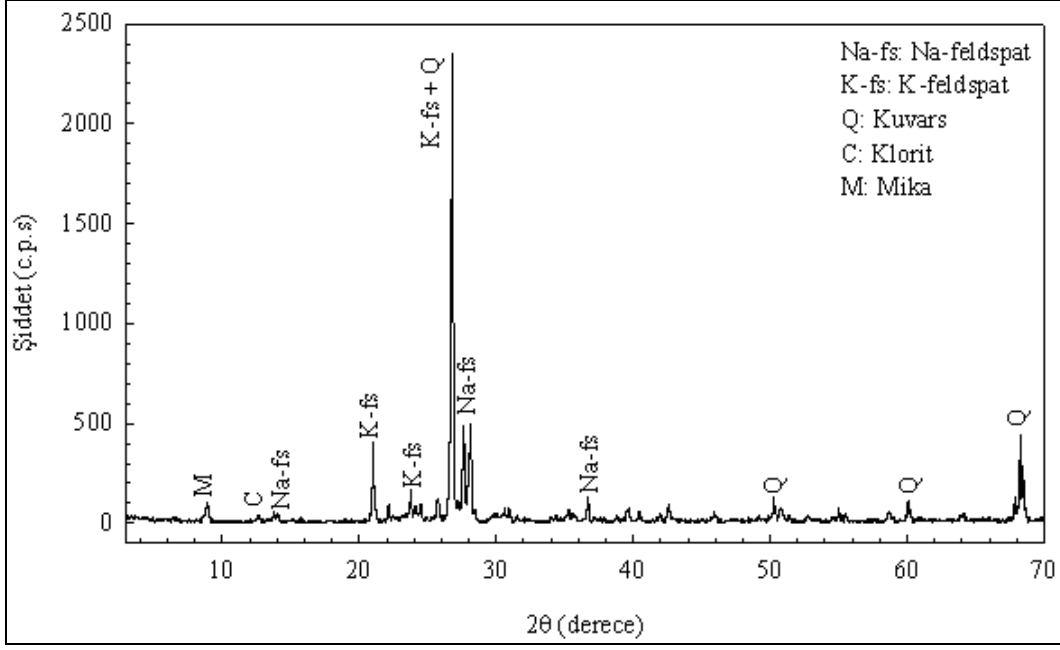
Ek Şekil 1. Carmen Red için elde edilen XRD toz kırınım deseni (iri taneli kayaç)



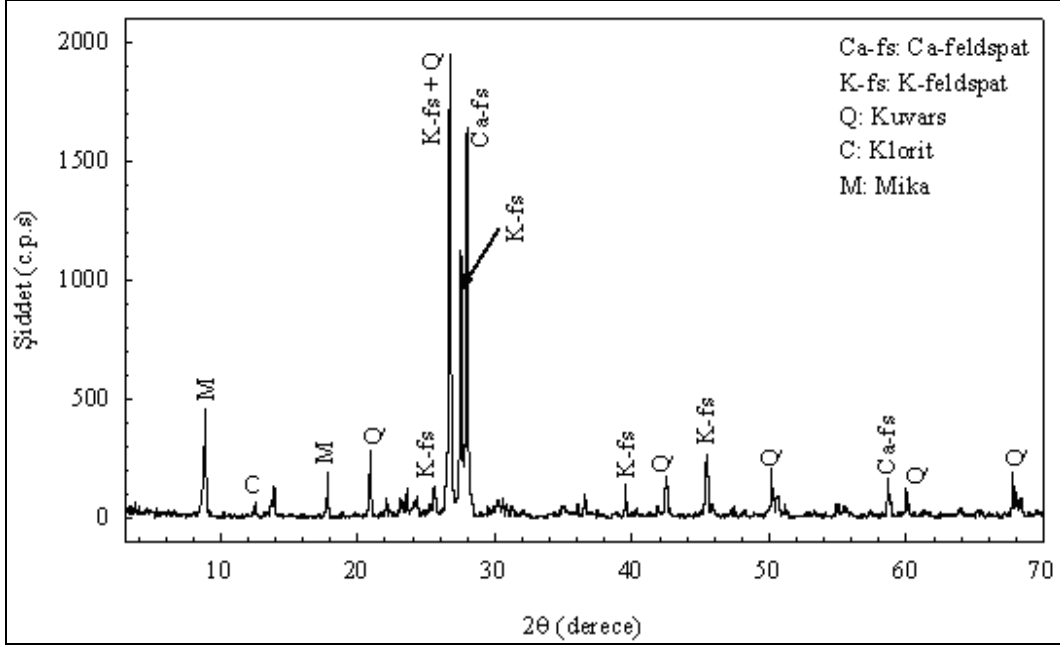
Ek Şekil 2. Baltic Brown için elde edilen XRD toz kırınım deseni (iri taneli kayaç)



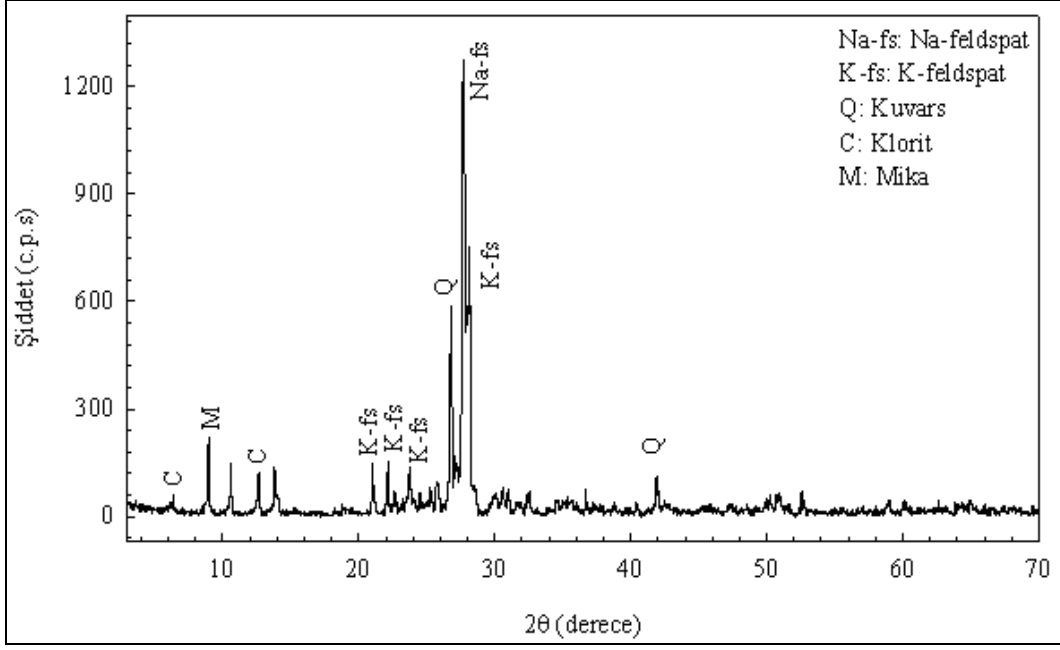
Ek Şekil 3. Rosa Minho için elde edilen XRD toz kırınım deseni (iri taneli kayaç)



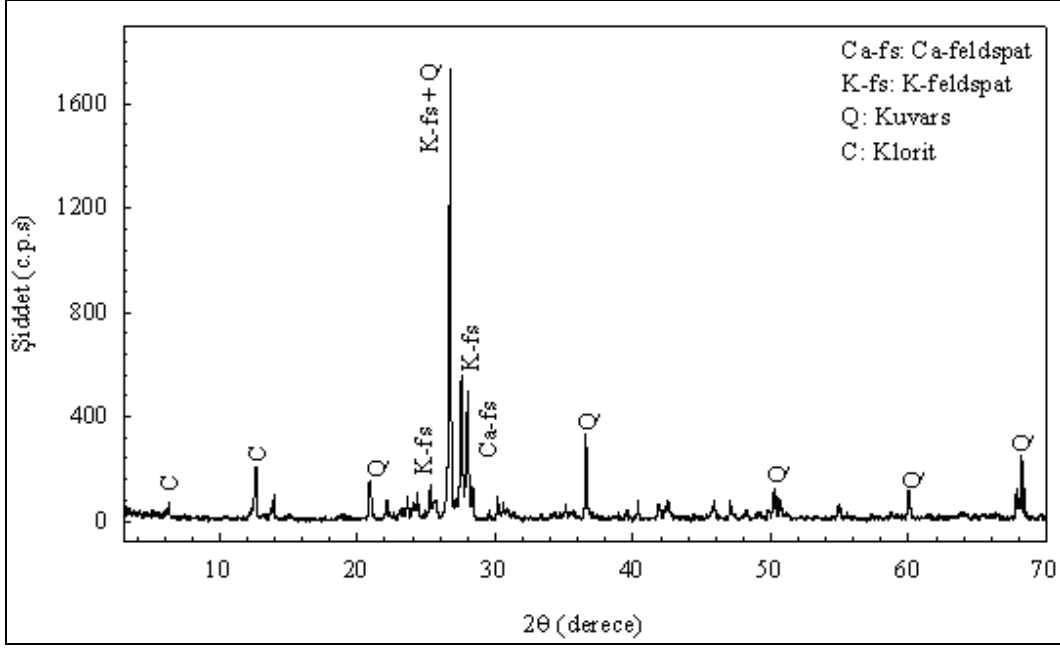
Ek Şekil 4. Aksaray Yayıllık için elde edilen XRD toz kırınım deseni (orta taneli kayaç)



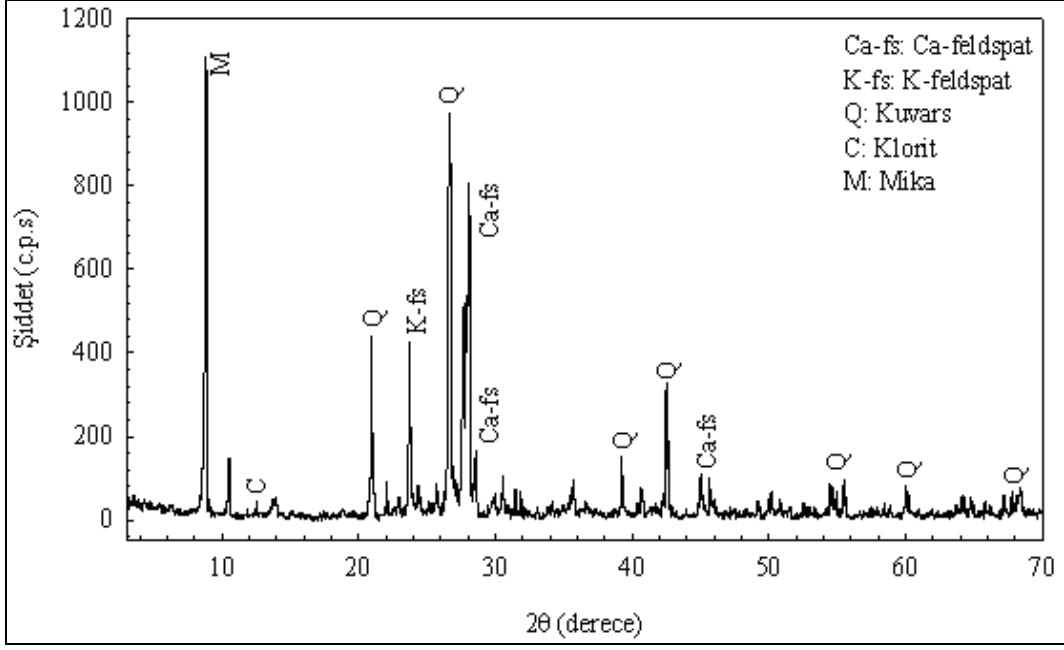
Ek Şekil 5. Azul Platino için elde edilen XRD toz kırınım deseni (orta taneli kayaç)



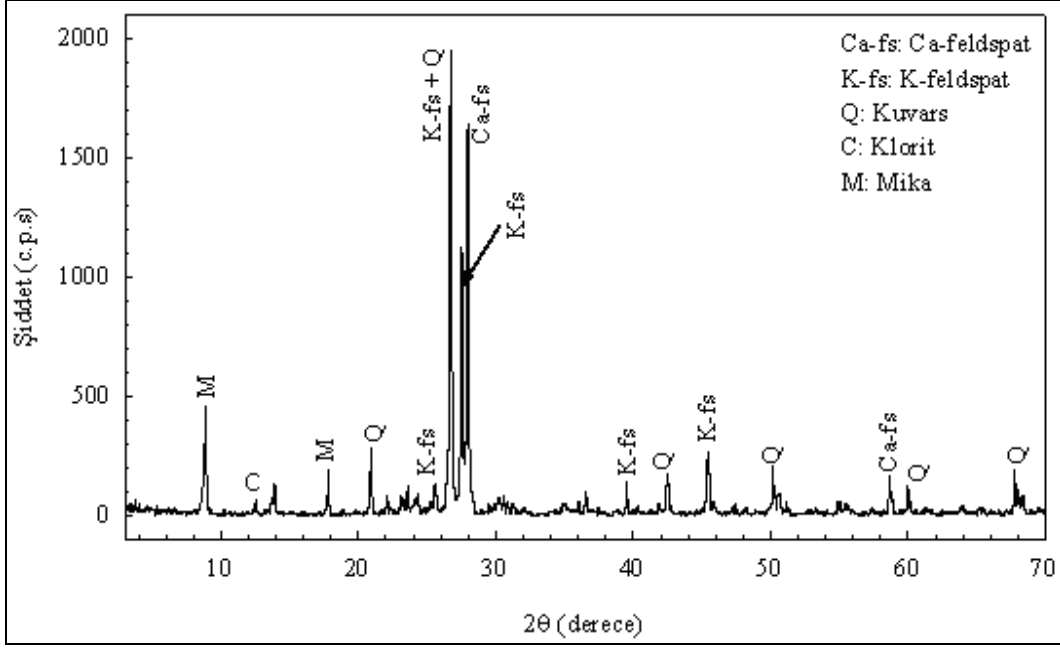
Ek Şekil 6. Giresun Vizon için elde edilen XRD toz kırınım deseni (orta taneli kayaç)



Ek Şekil 7. Multicolor Red için elde edilen XRD toz kırınım deseni (ince taneli kayaç)



Ek Şekil 8. Bergama Grey için elde edilen XRD toz Kırınım deseni (ince taneli kayaç)



Ek Şekil 9. Balaban Green için elde edilen XRD toz kırınım deseni (ince taneli kayaç)

ÖZGEÇMİŞ

19 Mayıs 1980’de Erzurum’un Horasan ilçesinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Horasan’da tamamladı. 1999’da Karadeniz Teknik Üniversitesi (K.T.Ü.) Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü’nde lisans eğitimine başladı. 20 Haziran 2003’de lisans eğitimini, bölüm birincisi olarak tamamladı. Aynı yıl K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başladı. Bir yıl K.T.Ü. Yabancı Diller Yüksek Okulu’nda İngilizce hazırlık programına devam etti. 15 Kasım 2005’de Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’na Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2 Şubat 2007’de K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü’nden “Maden Yüksek Mühendisi” olarak mezun oldu ve aynı Anabilim Dalı’nda Doktora eğitimine başladı. Doktora eğitimi sırasında bir yıl Leoben Üniversitesi’nde (Avusturya) Erasmus programı kapsamında değişim öğrencisi olarak eğitim gördü. Avusturya’da bulunduğu sırada, dört ay boyunca Rio Tinto Rabenwald Talk Madeni’nde (Weiz, Avusturya) burslu araştırmacı olarak çalıştı. Lisansüstü eğitimi süresince, çok sayıda uluslararası ve ulusal kongre, sempozyum ve konferansa katıldı. Bir adet uluslararası kitap, bir adet uluslararası kitapta bölümün ortak yazarları arasında yer aldı. Ayrıca, uluslararası hakemli ve indeksli dergilerde (SCI, SCIE ve SSCI) dokuz makale, ulusal hakemli on iki makale ve yirmi beş tanesi uluslararası olmak üzere otuz beş ulusal ve uluslararası bildirinin ortak yazarıdır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan yayınların listesi aşağıda sunulmuştur. Halen aynı Anabilim Dalı’nda doktora eğitimine devam eden İzzet KARAKURT, iyi derecede İngilizce bilmektedir.

A. Uluslararası Hakemli ve İndeksli Dergilerde Yayımlanan Makale(ler)

- A1. Aydın, G., **Karakurt, I.** and Aydiner, K., 2011. *An Investigation on the Surface Roughness of the Granite Machined by Abrasive Waterjet*. Bulletin of Materials Science 34(4), 985-992.
- A2. **Karakurt, I.**, Aydın, G. and Aydiner, K., 2011. *An Experimental Study on the Cut Depth of the Granite in AWJ Cutting*. Materials and Manufacturing Processes (in press; DOI: 10.1080/10426914.2011.593231).
- A3. Aydın, G., **Karakurt, I.** and Aydiner, K., 2011. *Performance of Abrasive Waterjet in Granite Cutting: Influence of the Textural Properties*. Journal of Materials in Civil Engineering (revised manuscript).

A4. Karakurt, I., Aydin, G. And Aydiner, K., 2011. *Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ)*. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences (under review).

B. Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makale(ler)

B1. Aydin, G., **Karakurt, I.** ve Aydiner, K., 2010. *Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Çalışma Parametrelerinin Granit Kerf Açısına Etkisinin Araştırılması*. Madencilik 49(2), 17-26.

B2. Karakurt, I., Aydin, G. ve Aydiner, K., 2010. *Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Kesme Parametrelerinin Granit Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi*. Hacettepe Üniversitesi, Yerbilimleri Dergisi, 31 (2), 99-109.

B3. Karakurt, I., Aydin, G. ve Aydiner, K., 2010. *Su Jeti Teknolojisinin Madencilik Sektöründeki Uygulamalarının Değerlendirilmesi*. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16 (1), 113-121.

B4. Aydin, G., **Karakurt, I.** and Aydiner, K., 2010. *Assessment of the Surface Quality of the Granite Cut by Abrasive Waterjet*. Technology 13(1), 41-49.

B5. Karakurt, I., Aydin, G. and Aydiner, K., 2011. *A Machinability Study of Granite Using Abrasive Waterjet Cutting Technology*. Gazi University Journal of Science 24(1), 143-151.

B6. Karakurt, I. , Aydin, G. ve Aydiner, K., 2011. *Kayaç Tane Boyutunun Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) Kesme Performansına Etkisi*. Madencilik 50(1), 23-32.

C. Uluslararası Hakemli Kongre ve Konferanslarda Yayımlanan Bildiri(ler)

C1. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., 2010. *Optimization of Process Parameters for Surface Roughness of Granite in Abrasive Waterjet Cutting*. Proceedings of the 10th. International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO SGEM 2010, Vol. 1, Varna, Bulgaria, pp. 499-506.

C2. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., 2010. *Effect of Process Parameters on the Kerf Widths in Abrasive Waterjet Cutting*. Proceedings of the 10th. International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO SGEM 2010, Vol. 1, Varna, Bulgaria, pp. 415-421.

C3. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., 2010. *An Investigation on Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Machining of Granite*. The 20th. International Conference on Water Jetting, Graz, Austria, pp. 469-475.

C4. Karakurt, I., Aydin, G., Aydiner, K., 2010. *Evaluation of the Cut Depths of the Granites Machined by Abrasive Waterjet*. MERSEM 7, International Marble and Natural Stone Congress, Afyon, Turkey, pp. 33-38.

- C5. Karakurt, I.,** Aydin, G., Aydiner, K., 2011. *Influence of the Rock Microhardness on the Cutting Performance of AWJ*. The 22nd. International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Ankara, Turkey, pp. 105-109.
- C6.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2010. An Experimental Study on Abrasive Waterjet Machining Through Design of Experiment. Proceedings of the 10th. International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO SGEM 2010, Vol. 1, Varna, Bulgaria, pp. 365-371.
- C7.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2010. *Determination of Major Process Parameters Affecting the Cut Depths of Granite in Abrasive Waterjet Cutting*. The 20th. International Conference on Water Jetting, Graz, Austria, pp. 477-483.
- C8.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2010. *An Experimental Study on the Kerf Geometry of the Granite Cut with Abrasive Waterjet*. MERSEM 7 International Marble and Natural Stone Congress, Afyon, Turkey, pp. 19-24.
- C9.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2011. *A Study on the Use of Taguchi Approach in AWJ Machining of the Granite*. The 22nd. International Mining Congress and Exhibition of Turkey, Ankara, Turkey, pp. 111-116.
- C10. Karakurt, I.,** Aydin, G., Aydiner, K., 2011. *Cutting Performance of the Granite Cut by AWJ: Effect of grain size*. 22nd. World Mining Congress and Expo, İstanbul, TURKEY, pp. 277-281.
- C11.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2011. *Evaluation of the Granite Surfaces Produced by AWJ*. 22nd. World Mining Congress and Expo, İstanbul, TURKEY, pp. 273-276.
- C12.** Aydin, G., **Karakurt, I.,** Aydiner, K., 2011. *Performance Optimization of Abrasive Waterjet Technology in Granite Cutting*. American Waterjet Conference and Expo 2011, Houston-Texas, United States, Paper F2.
- C13. Karakurt, I.,** Aydin, G., Aydiner, K., 2011. *Effect of the Uniaxial Compressive Strength of the Rock on the Cutting Performance of AWJ*. American Waterjet Conference and Expo 2011, Houston-Texas, United States, Paper F1.