

**BAZI TÜRK MERMERLERİNİN AŞINDIRICILI SU DEMETİ
İLE KESİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF CUTTABILITY PROPERTIES OF
SOME TURKISH MARBLES WITH ABRASIVE WATER JET**

İRFAN CELAL ENGİN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

MADEN Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

DOKTORA TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2006

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof. Dr. Naci BÖLÜKBAŞI

Üye(Danışman) :.....
Prof. Dr. Seyfi KULAKSIZ

Üye :.....
Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER

Üye :.....
Doç. Dr. Yılmaz ÖZÇELİK

Üye :.....
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali HİNDİSTAN

ONAY

Bu tez,/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet R. ÖZDURAL
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

BAZI TÜRK MERMERLERİNİN AŞINDIRICILI SU DEMETİ İLE KESİLEBİLİRLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İrfan Celal ENGİN

ÖZ

Bu çalışmada, mermer plaka ürünlerinin dekoratif amaçla çeşitli şekillerde kesilmesi amacıyla kullanılmaya başlanan aşındırıcı su demeti ile kesme yöntemi, farklı yapıdaki Türk mermerleri üzerinde uygulanarak mermerlerin kesilebilirlik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca şu andaki kullanımından farklı olarak daha derin kesim yapılarak blok mermerlerden plaka üretimindeki kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

Araştırma kapsamındaki Türk mermerleri yapısal özellikleri itibarıyla 8 farklı grupta değerlendirilmiş ve 50 değişik mermer örneği çalışma kapsamında kullanılmıştır. Alınan bu örneklerin kesilebilirlik özellikleri üzerinde etkisi olabileceği düşünülen fiziko-mekanik, mineralojik özellikleri belirlenmiş ve farklı kesim koşullarında aşındırıcı su demeti kesme uygulamaları yapılmıştır.

Kesilebilirlik kriteri olarak kesme derinliği kullanılmış, ayrıca yapılan uygulamalar sırasında kesme yüzeylerinde oluşan kesme izlerindeki sapmaların ve yüzey kalitesinin de bu amaçla kullanılabileceği tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, mermerlerin fiziko-mekanik özelliklerinden sertliği, birim hacim ağırlığı ve aşınma dayanımı; kesme parametrelerinden ise püskürtme memesi ilerleme hızı, pompa basıncı ve aşındırıcı besleme miktarının kesme derinliği üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda kesme derinliğinin kestiriminde kullanılmak üzere modeller önerilmiştir.

Araştırma kapsamında ayrıca mermerlerin aşındırıcı su demetiyle, standard keskiyle ve dairesel testereyle kesiminde gereken özgül enerji değerleri tespit edilmiş ve aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcı su demeti, mermer kesilebilirliği, kesme derinliği.

Danışman: Prof.Dr. Seyfi KULAKSIZ, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

INVESTIGATION OF CUTTABILITY PROPERTIES OF SOME TURKISH MARBLES WITH ABRASIVE WATER JET

İrfan Celal ENGİN

ABSTRACT

In this study, abrasive water jet cutting method, which has already been used for cutting decorative marble tiles, was applied to different Turkish natural stones to investigate abrasive water jet cutting properties of some Turkish natural stones. In addition, it is intended to use the method in strip production from natural stone blocks by deep cutting applications as a different technique from daily usage.

Turkish natural stones used in this study were classified into eight different groups according to their structural properties and fifty distinct natural stone samples were prepared for the investigations. Mineralogical, physical, and mechanical properties of the samples were investigated and abrasive water jet cutting applications were carried out in different operating conditions.

Criterion of cuttability properties of samples was considered as cutting depth, on the other hand, it was observed that, measure of deviations of water jet marks remained in the cutting surfaces were also able to be used.

In this research; hardness, unit volume weight, abrasion resistance as physico-mechanical properties of samples and nozzle traverse speed, pump pressure, and abrasive flow rate as cutting parameters were determined to be effective on cutting depth of samples. According to the results cutting models were suggested to use in prediction of cutting depth.

In this study, specific energy requirements for different cutting methods such as small scaled cutting set, circular diamond saw, and abrasive water jet were also found out and the relations between them were investigated.

Keywords: Abrasive water jet, cutting properties, cutting depth.

Advisor: Prof.Dr. Seyfi KULAKSIZ, Hacettepe University, Department of Mining Engineering

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince yardım ve katkılarını esirgemeyen ve beni sürekli destekleyen danışmanım Prof. Dr. Seyfi KULAKSIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Numune hazırlama, kaya mekaniği deneyleri ve mermer kesme deneylerinin yapılmasında bölümün laboratuvar ve diğer imkanlarından yararlanmamı sağlayan HÜ Maden Mühendisliği Bölümü adına Bölüm Başkanı Prof. Dr. Erhan TERCAN'a, araştırmaya maddi destek sağlayan TÜBİTAK kurumuna teşekkür ederim.

Tezin yazımındaki yapıcı eleştirileri ve katkılarından dolayı jüri üyeleri Prof. Dr. Naci BÖLÜKBAŞI, Prof. Dr. Bahtiyar ÜNVER, Doç. Dr. Yılmaz Özçelik ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Ali HİNDİSTAN'a teşekkür ederim.

Doğal taş örneklerinde mineralojik petrografik incelemeler yapılmasındaki yardımlarından dolayı Araş.Gör. Dr. Ali Murat AY'a, numune temini ve dairesel testere ile mermer kesme deneylerindeki yardımlarından dolayı Araş. Gör. Fatih BAYRAM ve Araş.Gör. Erhan YAŞITLI'ya teşekkür ederim.

Doğal taş örneklerinin aşındırıcılı su demetiyle pilot kesim uygulamalarını yapmam için imkan sağlayan CT Kesme Teknolojileri ve Makina San. ve Tic. Ltd. Şti. adına Mehmet Ata YALKILDAY'a ve firma çalışanlarına, ayrıca Tolka Waterjet and Decoration firması adına Ahmet YAMAN ve firma çalışanlarına teşekkür ederim.

Küçük boyutlu kazı setiyle mermer kesme deneylerinin yapılmasında ve Koni delici sertlik ölçümlerinin yapılmasında laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan İTÜ Maden Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü adına Bölüm Başkanı Prof. Dr. Güven ÖNAL'a, Maden Mekanizasyonu ve Teknolojisi A.B.D. Başkanı Prof. Dr. Nuh BİLGİN'e, deneylerin gerçekleştirilmesindeki içten ilgi ve yardımlarından dolayı Doç. Dr. Hanifi ÇOPUR, Araş. Gör. Cenk FERİDUNOĞLU ve Araş. Gör. Deniz TUMAÇ'a teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarım süresince her türlü destek ve sabrını esirgemeyen eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. SU DEMETLİ KESME TEKNOLOJİSİ	5
2.1. Su Demetlerinin Sınıflandırılması	5
2.2. Su Demetli Kesme Makineleri ve Donanımları.....	7
2.2.1 Yüksek Basınç Pompaları	9
2.2.1.1. Basınç yükselticili pompalar.....	9
2.2.1.2. Pistonlu pompalar	10
2.2.1.3. Pompa basıncının seçimi.....	12
2.2.2. Su Demeti Püskürtme Memeleri.....	14
2.2.2.1. Saf su demeti püskürtme memeleri	14
2.2.2.2. Aşındırıcı su demeti püskürtme memeleri.....	16
2.2.2.3. Su püskürtme memesi çapının seçimi	19
2.2.2.4. Odaklama tüpü çapı ve boyunun seçimi	20
2.2.2.5. Püskürtme memesi yanal hızının seçimi.....	21
2.2.2.6. Püskürtme memesi geçiş sayısının seçimi	21
2.2.2.7. Püskürtme memesi durma mesafesinin seçimi.....	22
2.2.2.8. Kesme açısının seçimi.....	23
2.2.3. Aşındırıcı Malzemeler ve Özellikleri	23
2.2.3.1. Aşındırıcı malzemelerin yapısı.....	24
2.2.3.2. Aşındırıcı malzemelerin sertliği	25
2.2.3.3. Aşındırıcı malzemelerin şekil özellikleri	26
2.2.3.4. Aşındırıcı malzemelerin tane büyüklüğü ve tane boyut dağılımı ...	27
2.2.3.5. Aşındırıcı malzeme ilave yöntemleri	30
2.2.4. Su Demeti Sönümleyicileri	34

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

Sayfa

2.2.5. Kontrol Birimi.....	35
3. AŞINDIRICILI SU DEMETİNİN YAPISI VE HİDRODİNAMİĞİ.....	37
3.1. Aşındırıcı Su Demetinin Yapısı	39
3.2. Aşındırıcı Malzemelerin Kinetik Enerjisi	41
3.3. Aşındırıcı Su Demetinde Aşındırıcı Tanenin İvmelendirilmesi.....	42
3.3.1. Enjeksiyon Tipli Aşındırıcı Su Demetinde Aşındırıcı Tanenin İvmelendirilmesi	42
3.3.2. Karışıklı Aşındırıcı Su Demetinde Aşındırıcı Tane İvmelendirilmesi .	43
3.4. Su Demeti - Aşındırıcı Tane Etkileşim Özellikleri	44
4. AŞINDIRICILI SU DEMETİYLE KESME TEORİLERİ.....	46
4.1. Tek Bir Aşındırıcı Tanenin Sebep Olduğu Aşınma	47
4.1.1. Sünek Malzemelerin Aşınması	47
4.1.2. Gevrek Malzemelerin Aşınması.....	48
4.2. Malzeme Uzaklaştırılmasının İki Boyutlu Modeli.....	50
4.3. Malzeme Uzaklaştırılmasının Üç Boyutlu Modeli	51
4.4. Malzeme Uzaklaştırılmasında Alternatif Modeller	52
4.5. Aşındırıcı Su Demetiyle Kesmede Enerji Denkliği.....	53
4.6. Aşındırıcı Su Demetiyle Kesmenin Matematiksel Modellenmesi.....	55
5. SU DEMETİNİN KULLANIM ALANLARI.....	61
5.1. Madencilikte Su Demeti Kullanımı	61
5.1.1. Delik Delme İşlemlerinde Su Demeti Kullanımı	61
5.1.2. Hidrolik ve Hidromekanik Madencilik.....	63
5.1.3. Doğal Taş Kesme ve İşlemede Su Demeti Kullanımı	66
5.2. İmalat Sanayiinde İleri Su Demeti Uygulamaları	69
6. ARAŞTIRMA MALZEMESİ ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR	71
6.1. Arazi Çalışmaları	73
6.2. Laboratuvar Çalışmaları.....	76
6.2.1. Mineralojik-Petrografik Özelliklerin Tespiti.....	77
6.2.2. Örneklerin Fiziko Mekanik Özelliklerin Tespiti	79
6.2.2.1. Birim hacim ağırlığı, su emme oranı ve görünür gözenekliliğin tayini	79

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

Sayfa

6.2.2.2. Shore Scleroscope ve Koni Delici sertliğinin belirlenmesi.....	81
6.2.2.3. Tek eksenli basma dayanımı ve Elastisite Modülünün belirlenmesi	84
6.2.2.4. Böhme yüzey aşınma dayanımının belirlenmesi.....	85
6.3. Aşındırıcılı Su Demetli Kesim Makinesi ile Pilot Kesim Deneyleri.....	86
6.3.1. Deneylerde Kullanılan Aşındırıcılı Su Demetli Kesim Makinelerinin Özellikleri.....	87
6.3.2. Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Deneylerinde Makine Kesme Koşulları	89
7. AŞINDIRICILI SU DEMETİYLE DOĞAL TAŞ KESİMİNDE KESİLEBİLİRLİĞİN BELİRLENMESİ İÇİN KULLANILAN FARKLI ÖLÇÜTLER.....	93
7.1. Kesme Derinliğinin Ölçümü ve Kullanılması	93
7.2. Kesim İzlerindeki Sapmaların Doğal Taşların Kesilebilirliğinin Belirlenmesinde Kullanılması.....	97
7.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Doğal Taşların Kesilebilirliğinin Belirlenmesinde Kullanılması	103
7.4. Doğal Taşların Aşındırıcılı Su Demetiyle Kesilebilirliğinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Farklı Ölçütlerin Karşılaştırılması	108
8. MAKİNE KESME PARAMETRELERİ ve DOĞAL TAŞ ÖZELLİKLERİ İLE AŞINDIRICILI SU DEMETİ KESME DERİNLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER.....	111
8.1. Doğal Taş Özellikleri – Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Derinliği Arasındaki İlişkiler.....	111
8.2. Kesme Parametreleri - Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Derinliği Arasındaki İlişkiler.....	118
8.3. Doğal Taş Örnekleri için Kesme Derinliği Modelinin Geliştirilmesi	122
8.3.1. Regresyon Analizi	123
8.3.2. Önerilen Kesme Derinliği Modelinin Literatürdeki Modellerle Karşılaştırılması	128
9. ÇEŞİTLİ KESME YÖNTEMLERİ İÇİN KESMEDE GEREKEN ÖZGÜL ENERJİ DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ.....	130
9.1. Küçük Boyutlu Kazı Setiyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneylerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması	131

İÇİNDEKİLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

Sayfa

9.2. Aşındırıcılı Su Demetiyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneylerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması	135
9.3. Dairesel Testereyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneylerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması	137
9.4. Farklı Kesme Yöntemlerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması	140
9.5. Su Demeti Kesme Yönteminin Doğal Taş İşleme Tesislerinde Blok Kesiciler Yerine Kullanılabilirliğinin Ekonomik Değerlendirilmesi.....	142
10. SONUÇLAR	144
11. TARTIŞMA ve ÖNERİLER	149
KAYNAKLAR.....	152
EKLER DİZİNİ.....	163

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A, B, C, D	Katsayıları malzemenin türüne göre değişen malzeme sabitleri
d^*	Ortalama tane çapı
d_0	Püskürtme memesi iç çapı
d_{demet}	Su demeti çapı
d_f	Odaklama tüpü çapı
d_n	Püskürtme memesi çapı
d_p	Aşındırıcı tane çapı
E_A	Aşındırıcılı su demetinin kinetik enerjisi
$E_{\text{Ç}}$	Çıkıştaki su demetinin kinetik enerjisi
E_M	Malzeme elastisite modülü
E_W	Su demetinin kinetik enerjisi
E_Y	Malzeme tarafından soğrulan enerji
F_{demet}	Su demetinin darbe kuvveti
$F_{\text{Ş}}$	Şekil faktörü
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kesme derinliği
H, H_M	İşlenen malzemenin sertliği
h_1	Suyun püskürtme memesine gelmeden önceki referans düzlemine göre yüksekliği
h_2	Suyun püskürtme memesini terk ettiği andaki yüksekliği
H_p	Aşındırıcı malzemenin Knoop sertliği
H_s	Shore sertliği
l_m	Koni delici sertlik değeri
ISRM	International Society for Rock Mechanics
K, a, b, c	Katsayılar
K_{Ic}	Malzeme darbe dayanımı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam Ediyor)

L	Püskürtme memesi uzunluğu
M_a	Aşındırıcı besleme miktarı
m_A, m_p	Aşındırıcı akış miktarı (debisi)
m_L	Hava akış miktarı
m_W	Su akış miktarı
n	Tane boyu dağılımının yayılımı
N_m	Malzeme işlenebilirlik katsayısı
N_p	Aşındırıcı tane sayısı
P, P_w, p	Su demetinin basıncı
P_{abr}	Sistemde kullanılan aşındırıcı malzemenin gücü
P_{atm}	Atmosfer basıncı
P_p	Pompa basıncı
p_s	Eşik basınç değeri
P_s	Sivri ucun örneğe batma miktarı
R_a	Pürüzlülük katsayısı
R_E	Aşınma direnci
S	Aşındırıcı tanenin şekil faktörü
S_k	Taşın kütlece su emme oranı
v	Püskürtme memesi yanal hızı
v_0	Suyun çıkıştaki hızı
v_{boru}	Suyun boru içindeki hızı
V_{demet}	Su demetinin hızı
v_L	Hava hızı
V_m	Aşınan malzeme hacmi
V_n	Püskürtme memesi yanal hızı
v_P	Aşındırıcı tane hızı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devam Ediyor)

V_{po}	Aşındırıcı malzeme akış hızı
W_N	Püskürtme memesi aşınma miktarı
X	Durma mesafesi
ρ_{demet}	Su demeti yoğunluğu
σ_c, σ_u	Tek eksenli basma dayanımı
\bar{d}_ϕ	Püskürtme memesi çıkışındaki tane boyu
\bar{d}_g	Püskürtme memesi girişindeki ortalama tane boyu
ρ	Aşındırıcı malzemenin yoğunluğu
ε	Birim deformasyon
Φ	Boyut küçülme sayısı
μ	Çeşitli kayıpları karakterize eden verim katsayısı
ν	Poisson oranı
$\Delta\varepsilon$	Uygulanan yük sırasında örnekte oluşan birim deformasyon
ρ_A	Karışım yoğunluğu
ρ_{su}	Suyun yoğunluğu
μ_{susp}	Momentum transfer katsayısı
σ_t	Çekme dayanımı
α_T	Enerji transfer katsayısı

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Su demetlerinin sınıflandırılması	5
Çizelge 2.2. Su demeti oluşturmada kullanılan pompaların karşılaştırması .	11
Çizelge 2.3. Aşındırıcı malzemelerin sınıflandırılması	23
Çizelge 2.4. Aşındırıcı malzeme gücü eşitliğindeki katsayılar	24
Çizelge 2.5. Çeşitli aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri	25
Çizelge 2.6. Granat mineral türlerine göre şekil faktörünün değişimi	27
Çizelge 4.1. Gevrek malzemeler için aşınma modelleri	50
Çizelge 4.2. Iihoshi et al. (1986) tarafından geliştirilen modele ait regresyon katsayıları	58
Çizelge 4.3. Yazıcı (1989) tarafından geliştirilen modele ait parametre sınırları ve ilgili regresyon katsayıları	58
Çizelge 6.1. Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan etmenler	72
Çizelge 6.2. Araştırmada kullanılan doğal taşların ticari isimleri ve grupları .	74
Çizelge 6.3. Mermer örneklerinde kristal tane büyüklükleri	79
Çizelge 6.4. Doğal taş örneklerinin birim hacim ağırlık ve su emme ve görünür gözeneklilik deney sonuçları	80
Çizelge 6.5. Doğal taş örneklerinin Shore Scleroscope sertlik deney sonuçları	82
Çizelge 6.6. Bazı Türk doğal taş örneklerinin Koni Delici sertlik deney sonuçları	83
Çizelge 6.7. Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü deney sonuçları.....	84
Çizelge 6.8. Doğal taş örneklerinin Böhme yüzey aşınma dayanımı deney sonuçları	86
Çizelge 6.9. Kesme deneylerinde kullanılan aşındırıcı malzemenin (granat) tane boyu dağılımı	88
Çizelge 6.10. Kesme deneylerinde seçilen kesme parametrelerinin değerleri	90

ÇİZELGELER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 7.1. Doğal taş örneklerinin aşındırıcılı su demeti kesme derinlikleri	95
Çizelge 7.2. Farklı kesme koşullarında seçilen parametrelerin türü ve değerleri.....	96
Çizelge 7.3. Doğal taş örneklerinin farklı kesme koşullarındaki aşındırıcılı su demeti kesme derinlikleri	96
Çizelge 7.4. Aşındırıcılı su demetiyle kesimde ilerleme hızı ve aşındırıcı miktarının eğrilik katsayısına ve aşındırıcı su demeti sapmasına etkisi.....	100
Çizelge 7.5. Doğal taş örneklerinde su demetinin kesim sırasındaki sapma miktarları	102
Çizelge 7.6. Doğal taş örneklerinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) (μm)	108
Çizelge 8.1. Deneysel çalışmalarda elde edilen kesme derinlikleri ile oluşturulan modelle hesaplanan kesme derinlik değerleri (12 nolu numune için)	124
Çizelge 8.2. Deneysel çalışmalarda elde edilen kesme derinlikleri ile oluşturulan modelle hesaplanan kesme derinlik değerleri	126
Çizelge 9.1. Bazı doğal taş örneklerinin küçük boyutlu kazı setinde kesilmesinde gereken özgül enerji değerleri	134
Çizelge 9.2. Su demeti kesme derinlikleri ve özgül enerji değerleri	136
Çizelge 9.3. Dairesel testere ile doğal taş kesmede gereken özgül enerji değerleri	139

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan su demetli kesme makinesi	8
Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan su demetli kesme makinesi ve bileşenlerinin şematik görünümü	9
Şekil 2.3. Basınç yükselticili pompanın şematik görünümü	10
Şekil 2.4. Pistonlu pompa sistemi	11
Şekil 2.5. Su demeti kesiminde pompa basıncının etkisi	12
Şekil 2.6. Bazı araştırmacıların kayaçlar için geliştirdikleri pompa basıncı-kesme derinliği ilişkileri	13
Şekil 2.7. Leach and Walker püskürtme memesinin yapısı	14
Şekil 2.8. Su demeti püskürtme memesinin genel yapısı	15
Şekil 2.9. Hassas kesim uygulamalarında kullanılan saf su demeti püskürtme memelerinin gerçek görünümü	16
Şekil 2.10. Aşındırıcılı su demeti püskürtme memesinin genel yapısı	16
Şekil 2.11. Su püskürtme memesi-odaklama tüpü bağlantı hataları sonucu oluşan sapmalar	17
Şekil 2.12. Aşındırıcı su demeti karışımı ve odaklama tüpündeki aşınmalar ...	18
Şekil 2.13. Aşındırıcılı su demeti kesiminde su püskürtme memesi çapının özgül kesme enerjisine etkisi	19
Şekil 2.14. Kayaçlarda püskürtme memesi çapının kesme derinliğine etkisi ...	20
Şekil 2.15. Aşındırıcılı su demeti kesiminde yanal hızın kesme derinliği üzerine etkisi	21
Şekil 2.16. Kayaç kesiminde geçiş sayısı – kesme derinliği ilişkisi	22
Şekil 2.17. Su demeti kesiminde durma mesafesinin kesme derinliğine etkisi	22
Şekil 2.18. Aşındırıcı taneler için şekil faktörü hesabında kullanılan değişkenler	26
Şekil 2.19. Aşındırıcılı su demetli kesme işleminde kullanılan aşındırıcı granat tanelerinin tipik şekilleri	27

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.20. Aşındırıcı debisi-kesme derinliği ilişkisi	29
Şekil 2.21. Aşındırıcı tane çapı-kesme derinliği ilişkisi	30
Şekil 2.22. Alternatif enjeksiyon tipi aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri	31
Şekil 2.23. Karışıklı su demetlerinde aşındırıcı ilave yöntemleri	32
Şekil 2.24. Kısa devre prensibiyle çalışan karışıklı su demeti düzeneği	32
Şekil 2.25. Kısa devre prensibiyle çalışan aşındırıcılı su demeti sistemi	33
Şekil 2.26. Doğrudan pompalama ilkesiyle çalışan su demeti sistemi	34
Şekil 2.27. Değişik yapıdaki su demeti sönümleyicileri (a:taşınabilir sönümleyici, b:tank tipi sönümleyici, c:kanal tipi sönümleyici)	35
Şekil 3.1. Su demeti oluşumunun şematik gösterimi	38
Şekil 3.2. (a) Su demeti ve (b) aşındırıcılı su demetinin püskürtme memesinden çıktıktan sonraki yayılımı	40
Şekil 3.3. Aşındırıcılı su demetinin doğrultu eksenine dik şematik A-A'kesiti	40
Şekil 3.4. Aşındırıcı tanelerin ivmelendirilmesinde momentum dengesi	43
Şekil 3.5. Karışıklı aşındırıcılı su demeti püskürtme memesinin yapısı	44
Şekil 4.1. Kesikli su demetinin hızlı çekim fotoğraf görüntüsü	46
Şekil 4.2. Mikro kesme modeli	48
Şekil 4.3. Gevrek malzeme yüzeyinde oluşan kırılma	49
Şekil 4.4. Aşındırıcılı su demetiyle kesme sürecinin iki boyutlu yapısı	50
Şekil 4.5. Malzeme uzaklaştırılmasının üç boyutlu modeli	52
Şekil 4.6. Malzeme uzaklaştırılmasının kesme önü modelleri	52
Şekil 4.7. Kesme önünde enerji durumu	54
Şekil 4.8. (a) İdeal ve (b) gerçekteki kesme durumunun şematik gösterimi	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.9. Aşındırıcılı su demetiyle kesimi sırasındaki demetin geometrik durumu	56
Şekil 5.1. Su demetiyle yapılan delik delme sistemi	62
Şekil 5.2. Kömür işletmeciliğinde su demeti kullanımına örnekler	62
Şekil 5.3. Su demeti monte edilmiş tamburlu kesicinin görünümü	63
Şekil 5.4. Granit ocağında kullanılan su demetli kesme makinesi	67
Şekil 5.5. Aşındırıcılı su demetiyle kesilen mermer kompozisyonuna bir örnek	68
Şekil 5.6. Satranç atının ileri aşındırıcılı su demeti tekniğiyle işlenmesi	69
Şekil 5.7. Aşındırıcılı su demeti ile tornalama yöntemi	70
Şekil 6.1. Araştırma kapsamında yapılacak çalışmalarda izlenecek yollar	71
Şekil 6.2. Doğal taş numunelerinin alındığı bölgeleri gösteren yer bulduru haritası	74
Şekil 6.3. Muğla–Milas yöresi doğal taş ocağının genel görünümü	75
Şekil 6.4. Afyon-İscehisar yöresi doğal taş ocağının genel görünümü	75
Şekil 6.5. Laboratuvar (a) ve kesme deneyleri (b) için hazırlanan bazı örnekler	76
Şekil 6.6. Araştırmada kullanılan LEICA marka görüntü analiz cihazı	77
Şekil 6.7. ImageJ görüntü analiz programı yardımıyla tane boyu karakterizasyonu	77
Şekil 6.8. Muğla Beyaz mermer örneğinin ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)C: Kalsit kristali (dilinimli ikizlenmeli)	78
Şekil 6.9. Sparitleşmiş fosilli kireçtaşı örneğinin (Fosilli Bej) örneğinin ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)	78
Şekil 6.10. Mikritik oolitik kireçtaşı örneğinin (Amasya bej) ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)	78
Şekil 6.11. Shore Scleroscope (C Tipi) sertlik ölçüm aleti	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 6.11. Shore Scleroscope (C Tipi) sertlik ölçüm aleti	81
Şekil 6.12. Shore sertliği ile Koni delici sertliği arasındaki ilişki	83
Şekil 6.13. Aşındırıcılı su demeti kesme makinesinin genel görünümü	87
Şekil 6.14. Aşındırıcılı su demeti kesme makinesinin temel bileşenleri (a: yüksek basınç pompası, b: aşındırıcılı su demeti birimi, c: aşındırıcı besleme birimi, d: kontrol birimi)	87
Şekil 6.15. Supreme Garnet (Hindistan) ticari isimli aşındırıcı granat mineralinin mikroskop görünümü (büyütme: x40)	89
Şekil 6.16. Doğal taş örneklerinin aşındırıcılı su demetiyle kesimi sırasındaki görüntüler	92
Şekil 6.17. Aşındırıcılı su demetiyle kesme deneyleri yapılan doğal taş örneklerinin bir kısmı	92
Şekil 7.1. Aşındırıcılı su demeti ile kesimi yapılan Afyon Gri (a) ve Sivrihisar Bej (b) numunelerinin kesim yüzeylerinin tarayıcıdan elde edilen görüntüsü	94
Şekil 7.2. Doğal taş kesim yüzeyinin karelere ayrılarak kesme derinliğinin milimetrik ölçümü	95
Şekil 7.3. 1 nolu doğal taş örneği yüzeyindeki su demeti kesim izleri	98
Şekil 7.4. 12 nolu doğal taş örneği yüzeyindeki su demeti kesim izleri ve koordinat eksenine aktarılması (200 mm/dk püskürtme memesi hızı, 500 g/dk aşındırıcı besleme miktarında)	99
Şekil 7.5. Değişik püskürtme memesi yanal hızlarında oluşan su demeti eğrisi ve eğri denkleminde değişimler	99
Şekil 7.6. Aşındırıcı besleme miktarının değiştirilmesiyle aşındırıcılı su demetinin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim	100
Şekil 7.7. Püskürtme memesi yanal hızının değiştirilmesiyle demetin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim (1 nolu örnek için)	101
Şekil 7.8. Aşındırıcı besleme miktarının değiştirilmesiyle demetin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim (1 nolu örnek için)	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.9. 12 nolu doğal taş örneği için artan kalınlığa karşılık püskürtme memesi yanal hızı grafiği	103
Şekil 7.10. SurfTest SJ-401 modeli iğne tipli pürüzlülük ölçer	104
Şekil 7.11. Doğal taş örneklerinde pürüzlülük ölçüm hatlarının konumu	104
Şekil 7.12. 7 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili	105
Şekil 7.13. 15 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili	105
Şekil 7.14. 6 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili	105
Şekil 7.15. Ölçüm hatlarının derinliğine karşılık bu hatlarda ölçülen ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki	106
Şekil 7.16. Artan püskürtme memesi yanal hızına karşılık ölçülen ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki	107
Şekil 7.17. Aşındırıcı besleme miktarına karşılık ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki (püskürtme memesi yanal hızı 200 mm/dk olarak seçilmiştir)	107
Şekil 7.18. Aşındırıcılı su demetinin düşeyden sapması-su demeti kesme derinliği ilişkisi	109
Şekil 7.19. Ortalama yüzey pürüzlülüğü-su demeti kesme derinliği ilişkisi	109
Şekil 8.1. Kristal tane boyu ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	111
Şekil 8.2. Doğal taş örneklerinin birim hacim ağırlığı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	112
Şekil 8.3. Doğal taş örneklerinin su emme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	113
Şekil 8.4. Doğal taş örneklerinin görünür gözenekliliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	114
Şekil 8.5. Doğal taş örneklerinin Böhme yüzey aşınma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	114
Şekil 8.6. Doğal taş örneklerinin Shore Scleroscope sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	115

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 8.7. Doğal taş örneklerinin Koni delici sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	116
Şekil 8.8. Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	116
Şekil 8.9. Doğal taş örneklerinin elastisite modülü ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	117
Şekil 8.10. Doğal taş örneklerinin çekme dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	118
Şekil 8.11. Püskürtme memesi yanal hızı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	119
Şekil 8.12. Aşındırıcı besleme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	120
Şekil 8.13. Pompa basıncı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	120
Şekil 8.14. Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki	121
Şekil 8.15. Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile kesilen yarığın genişliği arasındaki ilişki	122
Şekil 8.16. Gerçek derinlik değerleri ile oluşturulan model yardımıyla belirlenen derinlik değeri arasındaki ilişki	124
Şekil 8.17. Gerçek derinlik değerleri ile oluşturulan model yardımıyla belirlenen derinlik değerleri arasındaki ilişki	127
Şekil 9.1. Küçük boyutlu kazı deney seti	131
Şekil 9.2. Küçük boyutlu kazı deney setinde deney yapılan bir örnek	131
Şekil 9.3. 30 nolu örnek için küçük boyutlu kazı setiyle yapılan kesme deneyinde kesimde oluşan normal ve kesme kuvvetleri	133
Şekil 9.4. Özgül enerji ölçümü amacıyla su demetiyle kesimde kullanılan örneğin şematik görünümü	135
Şekil 9.5. Bilgisayar kontrollü dairesel testereli yan kesme makinesi	137
Şekil 9.6. 32 nolu örnek için dairesel testereyle yapılan kesme deneyinde geçen süreye karşılık harcanan güç değerlerinin değişimi	138

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam Ediyor)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 9.7. Keski ve su demeti ile kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması	140
Şekil 9.8. Dairesel testere ve aşındırıcılı su demeti ile kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması	141
Şekil 9.9. Dairesel testere ve kesici uç ile yapılan kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması	141
Şekil 11.1. Su demeti kesimine alternatif yaklaşımlar	151

1. GİRİŞ

Akarsuların aşındırma etkisi doğada sel ve benzeri afetlerdeki gibi kısa sürelerde veya kayalar içerisinde derin vadileri oluşturmasındaki gibi milyonlarca yıl gibi uzun sürelerde kendisini göstermektedir. Birçok yerşekili bu aşındırma etkisiyle meydana gelmiştir. Ülkemizdeki İhlara vadisi buna en güzel örnektir.

Araştırmacılar, suyun bu aşındırma etkisini görerek bu gücü kontrol altına alıp endüstride kullanma yoluna gitmişlerdir. Su gücünden yararlanılarak yapılan ilk kazı çalışmalarının Roma İmparatorluğu zamanına kadar uzandığı ifade edilse de tarihte kesin olarak bilinen ilk uygulama 1852 yılında altın içeren kayaların kazılması amacıyla Amerika Birleşik Devletleri'nde su demetinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. 19. yüzyılın sonlarına gelindiğinde ABD'nin birçok eyaletinde altın madenciliği bu yöntemle yapılır olmuştur. 20. yüzyılın başlarında su demeti (water jet) ile kömür kazısı amacıyla madencilikte kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde Rusya, Kanada, Japonya ve Çin Halk Cumhuriyeti başta olmak üzere birçok ülkede yaygın olarak su demetiyle madencilik yapılmaktadır. Su demeti yalnız başına kullanıldığı gibi mekanik kesicilerle birlikte de kömür kazısında kullanılmaktadır. Bugün ayrıca doğal taş işletmelerinde yüksek basınçlı su demeti sistemleri blok mermer üretiminde kullanılmaya başlanmış ve olumlu sonuçlar alınmıştır (Summers, 1971; Frank, 1981; Summers and Yazıcı, 1989; Wilson et al., 1997).

Bütün bu gelişmelere paralel olarak, imalat sanayiinde, gelişen malzeme teknolojisi ve üretim yöntemlerinin yetersiz kalması sonucunda su demetinin kullanımı gündeme gelmiş ve ilk olarak su demeti 1970'li yıllarda oluklu mukavva kesiminde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde, kağıt, gıda maddesi, fiberglas, yalıtım malzemeleri, bazı plastikler ve bazı kompozitleri de içeren çeşitli yumuşak/hafif malzemeler su demeti ile kesilebilmektedir. 1982 yılından itibaren su demetinin kesme gücünün artırılması amacıyla içerisine aşındırıcı malzeme eklenerek aşındırıcılı su demeti (abrasive water jet) oluşturulmuş ve neredeyse tüm malzemelerin kesilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu gelişmeyle birlikte uzay - havacılık, elektrik- elektronik, otomotiv, gıda, metal, tekstil, kağıt, plastik ve deri sanayiinde; cam, mermer, granit ve seramik sektöründe geniş çapta kullanılmaya

başlanmıştır (Draughon, 1981; Hashish et al., 1983, 1996; Geren ve Tunç, 2001; Külekçi, 2002).

Çeşitli araştırmacılar saf su demetini sürekli ve kesikli olarak kullanarak kayalarda kesme çalışmaları yapmışlar ve kesme işlemini etkileyen parametreler arasında ilişkiler kurmaya çalışmışlardır (Brook and Summers, 1969; Cooley, 1972; Mellor, 1972; Crow, 1973; Moodie and Taylor, 1974; Hashish and Plesis, 1978; 1979, 1981; Chermesky, 1976; Bortolussi et al., 1988; Hagan, 1992). Kömürün saf su demetiyle kesilmesi konusunda laboratuvar ve pilot çapta Nikonov and Goldin (1972), Summers and Peters (1974), Summers and Mazurkiewicz (1976), Moodie (1976) ve Heincker et al. (1976) araştırma yapan kişiler olarak öne çıkmaktadır. Çeşitli araştırmacılar da aşındırıcı katkılı su demetleri ile kayalarda kesme ve kazı çalışmaları gerçekleştirmişlerdir (Ihoshi et al., 1986; Bortolussi et al., 1988; Yazıcı, 1989; Lauand et al., 2000; Xiaohong et al., 2000; Miranda and Quintino, 2005).

Su demeti terimi çok yüksek hızlardaki su hüzmesini ifade etmektedir. Su demetleri, çok yüksek basınçlara yükseltile (300-400 MPa) suyun elmas, safir vb. gibi özel malzemelerden yapılmış dar bir aralıktan (püskürtme memesinden) geçirilmesi ile elde edilmektedirler. Su demetinin, uygulandığı malzeme içerisine nüfuz ederek bileşenlerini aşındırıp uzaklaştırmasıyla da kesme işlemi gerçekleşir. Saf su demetinin gücü plastik, mukavva, köpük, ahşap vb. malzemeleri kesip işlemeye yeterli olurken; cam, metal, kompozit, kayaç vb. malzemelerin kesilmesi için su demeti oluşturulurken içerisine aşındırıcı malzeme ilave edilerek aşındırma gücü artırılmaktadır. Bu gelişme ile oluşturulan aşındırıcılı su demeti neredeyse her çeşit malzemenin kesilip işlenmesine olanak sağlamıştır.

İmalat sektöründe kullanılan kesme sistemleri kesici malzemenin yapısına göre üç kısma ayrılabilir. Bunlar; ısı kesme sistemleri (lazer, çeşitli kaynaklar ile kesim), mekanik kesme sistemleri (değişik testereler, keskinlerle kesim), su demetli kesme sistemi (su demeti veya aşındırıcılı su demeti ile kesim). Mekanik ve ısı kesme sistemlerinde kesilen malzeme üzerinde bir kuvvet veya ısı etki olduğundan malzeme yapısında istenmeyen bozulmalar oluşmaktadır. Özellikle aşındırıcılı su demetiyle kesme işleminde malzeme üzerinde bir kuvvet ve ısı etki oluşmadığından kesim yüzeylerinde herhangi bir şekil değiştirme veya yapısal bozulma görülmemektedir.

Saf su demetiyle ve karışım tipi aşındırıcı katkılı su demetleri ile kayalarda ayrıntılı kesme ve kazı çalışmaları yapılmasına karşılık, çeşitli avantajlarından dolayı hassas kesim çalışmalarında kullanılan enjeksiyon tipi aşındırıcı su demeti ile kayaç kesme çalışmaları yok denilecek kadar azdır. Bu çalışma ile yakın zamanda dekoratif mermer ürünlerinin kesilmesinde kullanılmaya başlanan enjeksiyon tipi aşındırıcı su demetli kesme sistemiyle bazı Türk mermerlerinin kesilebilirliği araştırılarak öncelikle bu konudaki eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde su demeti ile ilgili genel bilgiler verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, su demeti teknolojisi hakkında bilgi verilmiş olup, su demetlerinin sınıflandırılması yapılmış ve su demetli kesme makinelerinin donanımları hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca su demetiyle kesmede makine parametrelerinin seçimiyle ilgili bazı öneriler de sunulmuştur. Çalışmanın üçüncü bölümünde ise su demetinin ve aşındırıcı su demetinin yapısı ve hidrodinamiği hakkında bilgi verilmiştir. Aşındırıcı su demeti oluşturulmasında uygulanan farklı teknikler yine bu bölümde verilmektedir. Su demeti ve aşındırıcı su demetiyle kesme teorileri ise çalışmanın dördüncü bölümünde verilmiştir. Metalik malzemeler, sünek malzemeler, seramik ve kayaç gibi gevrek malzemelerin kesilmesinde oluşan farklı kesme mekanizmaları yine bu bölümde tartışılmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde ise su demetinin farklı kullanım alanları verilmiştir. Su demetinin endüstrideki kullanımı ve özellikle madencilikteki bugünkü kullanımı ve ileride potansiyel kullanım alanları ile aşındırıcı su demetinin ileri tekniklerle kullanımı konularında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde ise yapılan arazi çalışmaları, deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Öncelikle Türk mermerleri yapı-doku ve oluşum özellikleri itibariyle çeşitli gruplara ayrılarak her gruptan örnekler hazırlanmıştır. Bu örneklerin mineralojik ve fizikomekanik özellikleri incelendikten sonra aşındırıcı su demetiyle farklı kesim koşullarında kesim uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kesme uygulamalarında mermerlerin kesilebilirliğini ifade etmekte kullanılabilecek kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü ve kesim sırasında su demetinde oluşan sapma miktarı gibi ölçütler ise yedinci bölümde incelenmiştir. Mermerlerin yapısal özellikleriyle ve makine kesme parametreleriyle, kesilebilirlikleri arasındaki ilişkiler

ise sekizinci bölümde araştırılmıştır. Çalışmanın dokuzuncu bölümünde, en düşük enerji maliyetli kesme yönteminin belirlenmesi amacıyla mermerlerin su demetiyle, mekanik olarak keskiyle ve dairesel testerelerle kesiminde gereken özgül enerji değerleri de araştırılmıştır. Onuncu ve onbirinci bölümlerde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

2. SU DEMETLİ KESME TEKNOLOJİSİ

Su demetli kesme teknolojisinde kesici eleman yüksek basınç ve hıza sahip çoğunlukla aşındırıcı katkılı su demetidir. Yöntem, su demetini bir kesme aracı olarak kullanarak çeşitli malzemelerde aşındırma etkisiyle kesme ve işlemeyi kapsamaktadır. Farklı amaçlar için su demetini kullanan değişik kesme makineleri geliştirilmiştir.

2.1. Su Demetlerinin Sınıflandırılması

Su demetleri, kullanım amacı, çalışma ortamı, basıncı, içeriğindeki kimyasal veya aşındırıcı katkıları ve su demetinin sürekliliği bakımından çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Çizelge 2.1’de su demeti türleri ana başlıklar altında verilmiştir.

Çizelge 2.1. Su demetlerinin sınıflandırılması (Akçın, 1986, Momber and Kovacevic, 1998)

<i>Sınıflandırma Kıstası</i>	<i>Su Demeti Türleri</i>
Kullanılan Pompa Basıncına Göre	a) Düşük basınçlı su demetleri b) Yüksek basınçlı su demetleri
Su Akışının Sürekliliğine Göre	a) Sürekli (devamlı) su demetleri b) Kesikli su demetleri 1. Çok darbeli kesikli su demetleri 2. Tek darbeli kesikli su demetleri (Su topları)
Katkı Türüne Göre	a) Katkısız su demetleri (Saf su demetleri) b) Katkılı su demetleri 1. Kimyasal katkılı su demetleri 2. Aşındırıcı katkılı su demetleri
Kullanım Amacına Göre	a) Temizleme amaçlı su demetleri b) Kazı, kesme-parçalama amaçlı su demetleri c) Hassas kesim amaçlı su demetleri
Kullanıldığı Ortam Koşullarına Göre	a) Serbest su demetleri b) Daldırma su demetleri

Kesme verimliliğini doğrudan etkilediğinden, su demetleri kullanılan pompa basınçlarına göre düşük basınçlı su demetleri ve yüksek basınçlı su demetleri olarak iki grupta incelenmektedir. Düşük veya yüksek basıncı ayıran kritik basınç

değerini belirlemek güç olacağından, pompa türlerine göre, pistonlu pompalarla oluşturulan su demetleri düşük basınçlı (<270 MPa), basınç yükselticili pompalarla oluşturulan su demetleri ise yüksek basınçlı (>270 MPa) su demetleri olarak sınıflandırılmıştır.

Su demetleri, demeti oluşturan suyun akışına göre sürekli su demetleri ve kesikli su demetleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

Sürekli su demetlerinde su akışı sürekli ve laminer karakterdedir. Su demeti malzeme yüzeyine uygulandığı müddetçe basıncı, hızı ve malzemedeki oluşan kalıcı basınç sabit kabul edilmektedir. Sürekli su demetleri kullanım amacına göre, seçilen püskürtme memesi yapısına uygun olarak bir hüzmeye şeklinde veya saçınımlı şekilde oluşturulur. Su demeti doğrusal şekilde oluşturulduğunda kesme-kazı amacıyla kullanılırken, saçınımlı şekilde oluşturulduğunda ise yüzeylerden çeşitli malzemelerin temizlenmesinde kullanılır.

Kesikli su demetlerinde ise su akışı laminer olmakla birlikte sürekli değildir. Püskürtme memesinden (nozül) çıkan su demeti (water jet) bazı akım kesici düzeneklerle milisaniye mertebesindeki aralıklarla kesik-kesik verilmektedir. Su akışını kesikli hale getirmek için ya dönen delikli bir disk ya da yıldız bir tekerlek, sinüzoidal olarak açılıp kapanan bir vana veya ileri geri hareket eden bir piston kullanılmaktadır. Kesikli su demetleriyle malzeme yüzeyine aktarılan kalıcı basınç sürekli demetlerin aktardığı kalıcı basınçtan birkaç kat daha yüksek olduğu için bu tür su demetleri malzemelerin kırılması ve parçalanmasında kullanılmaktadır. Çok sert ve kalın malzemelerin kesilip parçalanmasında gereken çok yüksek hız ve basınca ancak özel olarak yapılmış su toplarıyla ulaşılabilmektedir. Bunlarla kesik-kesik olarak verilen suyun malzeme yüzeyinde oluşturduğu kalıcı basınç, pompalardan elde edilen basınçlardan çok daha yüksektir. Örneğin; 610 MPa'lık bir basınçla, su demeti, 3500 m/s hıza ulaşabilmektedir (Edny, 1976).

Basınçlı su demetleri ayrıca içerisine herhangi bir katkı ilave edilip edilmemesine göre de ikiye ayrılmaktadır. Bunlar katkısız su demetleri (saf su demetleri) ve katkılı su demetleridir. Katkılı su demetleri kimyasal katkılı ve aşındırıcı katkılı (aşındırıcılı) su demetleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Katkılı su demetlerinin önemli bir kısmını aşındırıcılı su demetleri oluşturmaktadır. Sadece yüksek

basınçlı suyun kullanılmasıyla elde edilen su demetleri katkısız veya saf su demetleri olarak adlandırılır. Aşındırıcılı su demeti ile saf su demeti arasındaki temel fark, su demetinin kesme gücünün artırılması amacıyla içerisine aşındırıcı malzeme eklenmesidir. Aşındırıcılı su demeti sistemi, ısı ve mekanik kısıtlamalar sebebiyle diğer yöntemlerle işlenemeyen malzemelerin işlenebilmesine imkan sağlamıştır. Sistem geniş çapta kayaç, titanyum, çelik, pirinç, alüminyum, cam, kompozit gibi birçok malzemenin işlenmesinde kullanılmaktadır.

Özellikle saf su demetlerinin 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 demetleri oluşturulmaktadır.

Su demetleri kullanım amaçlarına göre de sınıflandırılmaktadır. Çeşitli yüzeylerden boya, pas vb. malzemelerin temizlenmesinde kullanılan düşük basınçlı su demetleri temizleme amaçlı, kömür veya kayaç kazısında kullanılan su demetleri kesme-kazı amaçlı, imalat endüstrisinde farklı şekillerde düşük toleranslarla kesimde kullanılan su demetleri hassas kesim amaçlı su demetleri olarak sınıflandırılabilir.

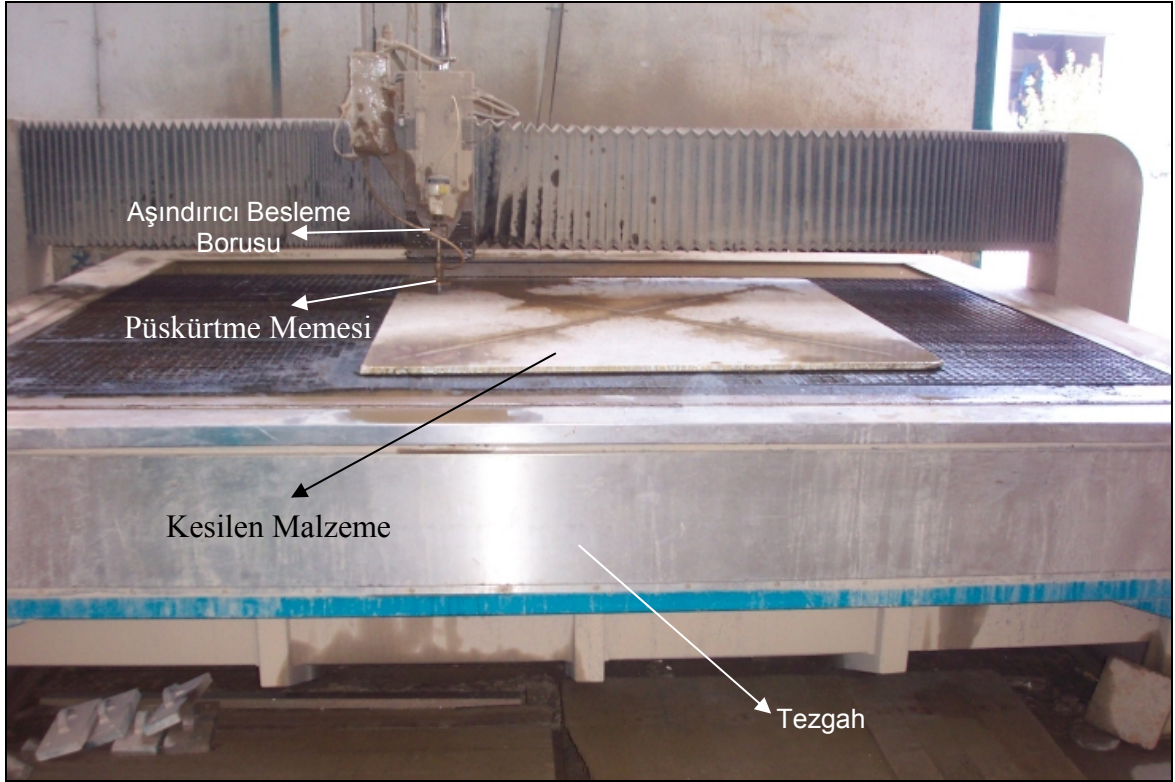
Bunların dışında, su demetleri kullanıldığı ortam koşulları bakımından serbest su demetleri ve daldırma su demetleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Eğer su demeti atmosfer basıncında bir hava ortamında kesme veya kazı işlemi yapıyorsa serbest su demeti, su altı çalışmalarında veya kuyu açma çalışmalarında olduğu gibi su demeti yine su içerisinde kesme-kazı işlemi yapıyorsa o zaman daldırma su demeti olarak isimlendirilmektedir.

2.2. Su Demetli Kesme Makineleri ve Donanımları

Su demetli kesme makinelerinde (water jet cutting machine) kullanım yeri ve amacı, makine boyutları ne olursa olsun iki temel bileşen mevcuttur. Bunlar; basınç üreten pompa ve suyun yüksek hızla sistemi terk ettiği dar bir aralık içeren püskürtme memesidir. Yapılan işin amacına göre pompa basıncı, püskürtme memesi çapı ve yapısı ve bunlarla birlikte diğer yardımcı ünitelerin yapısı da değişmektedir.

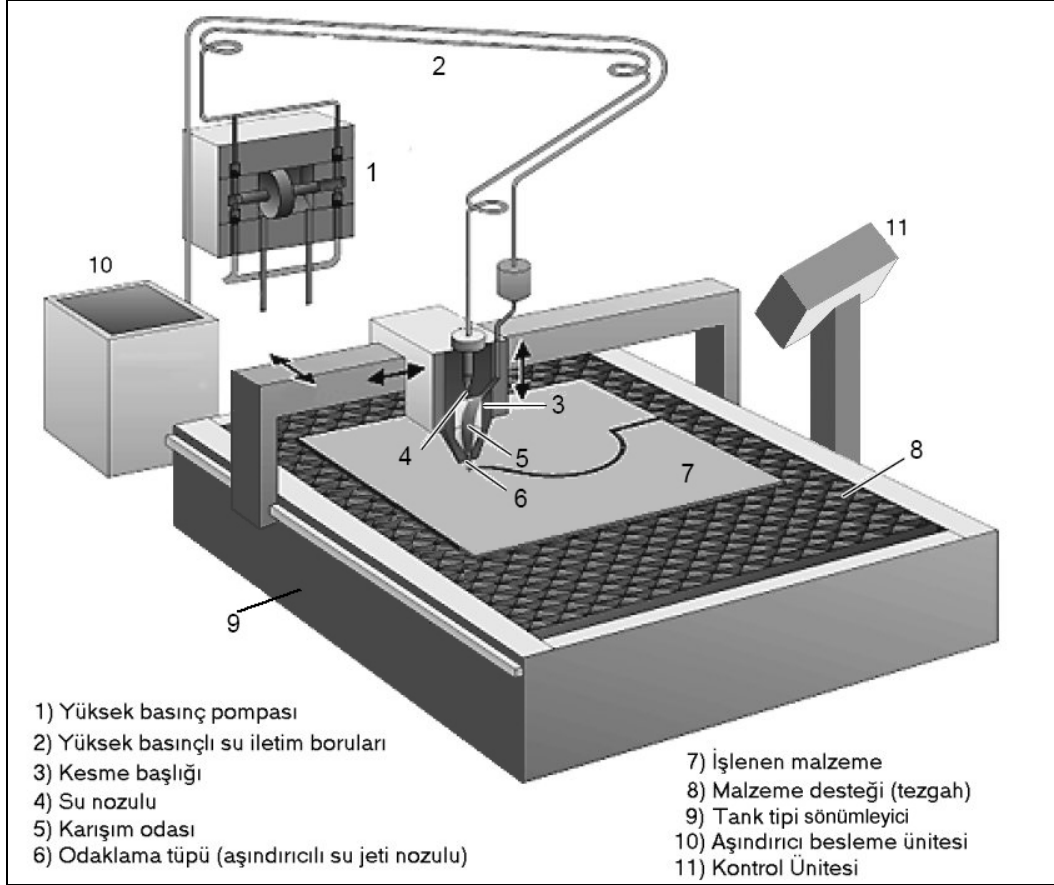
Genel olarak su demetli kesme makineleri; düzlemsel parçalar kesebilen 2 veya 3 eksenli makineler, özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılan 3 boyutlu hacimsel parçalar kesebilen 5 eksenli makineler veya su demeti ile 6 eksenli robotların birleştirilmesiyle oluşturulan kesme hücreleri olarak gruplandırılabilir (Geren ve Tunç, 2001).

Bu araştırmada kullanılan su demetli kesme makinesi (Şekil 2.1, Şekil 2.2), kesme kafasının bir köprü üzerine monte edilmesiyle, ileri-geri, sağa-sola ve yukarı-aşağı hareketi sonucunda iki boyutta kesim yapabildiği düzlemsel kesme makinesidir.



Şekil 2.1. Çalışmada kullanılan su demetli kesme makinesi

Düzlemsel parçaların kesilmesinde kullanılan makineler dört temel eleman ve buna bağlı diğer yardımcı bileşenlerden oluşmaktadır. Temel bileşenler; yüksek basınç pompası, aşındırıcı besleme ünitesi, kesme kafası (aşındırıcılı su demeti püskürtme memesi) ve bilgisayarlı kontrol ünitesidir (Şekil 2.2). Makineyi oluşturan diğer bileşenler ise yüksek basınçlı su iletim boruları, tezgah ve sönümleyicilerdir.



Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan su demetli kesme makinesi ve bileşenlerinin şematik görünümü (Trumpf, 1997'dan değiştirilerek alınmıştır)

2.2.1 Yüksek Basınç Pompaları

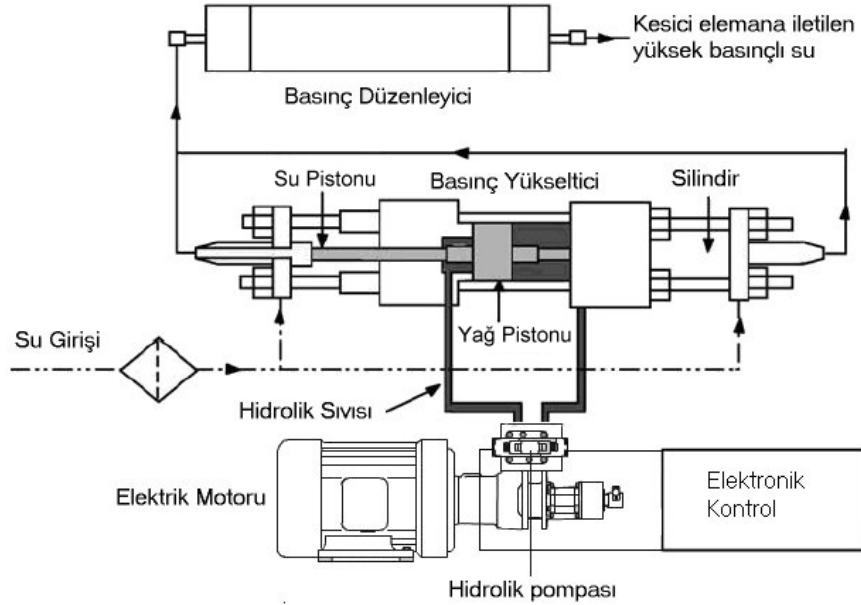
Geleneksel pompalar su demetiyle kesim için gerekli yüksek basınçları üretmekten oldukça uzaktır. Su demeti oluşturmada basınç yükselticili ve pistonlu olmak üzere iki farklı yapıda pompa kullanılmaktadır. Bu pompalarla 700 MPa'a kadar yüksek basınçlara çıkmak mümkün olmaktadır.

2.2.1.1. Basınç yükselticili pompalar

Bu sistemdeki basınç yükseltici ünitesinde, birbirine merkezden bağlı farklı çaplı silindirler yardımıyla hidrolik pompa ünitesinde oluşturulan basınç, Pascal prensibi gereği, piston alanları ile orantılı olacak şekilde artırılmaktadır (Şekil 2.3).

Su ve yağ pistonlarının alanları oranı, basınç yükseltme oranı olarak adlandırılır ve bu oran 20 civarındadır. Örneğin; yağ silindirine giren 20 MPa basınçtaki hidrolik yağın yağ pistonunu itmesiyle buna merkezden bağlı su pistonu kolu 400 MPa'lık su basıncı oluşturmaktadır. Basınç yükseltici içerisindeki silindir hareketinin sonuna gelen pistonlar yön değiştirdiği sırada basınçta ani düşüşler meydana

gelmektedir. Bu düşüşü önlemek amacıyla, kesme kafasına gelmeden önce su basıncını dengeleyen bir birim bulunmaktadır. Bu kısım basınç değişimlerini asgariye indirerek sisteme sürekli yüksek basınçta su verilmesini sağlamaktadır.

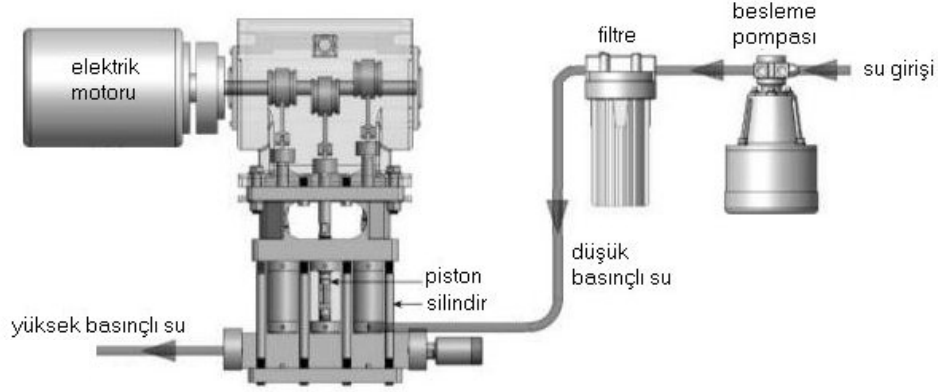


Şekil 2.3. Basınç yükselticili pompanın şematik görünümü (Külekçi, 2002)

Basınç yükselticili tipteki pompaların bu türünden başka sistemdeki basınç düşüşünü önlemek amacı için tasarlanmış daha gelişmiş modeller de mevcuttur. Kademeli basınç yükselticili pompalar olarak adlandırılan bu tip pompaların çalışma prensibi temelde aynı olmasına karşın, sistem iki adet tek taraflı hidrolik silindir ve su silindiri içerecek şekilde tasarlanmıştır. Her iki hidrolik silindir içerisine gönderilen yağın debisi (dolaylı olarak piston hızları) özel tasarlanmış bir manifold ile kontrol edilerek, bir su silindirindeki piston darbesinin sonuna geldiğinde diğerinin darbesinin ortasında olması sağlanmaktadır. Böylece basınç düzenleyici sistemine olan ihtiyaç ortadan kaldırılarak, sistemin sürekli sabit basınç oluşturması sağlanmıştır. Fakat, temelde daha basit gibi görünen bu sistemin kontrolü ve kontrolü sağlayan manifoldun yapısı daha karmaşıktır.

2.2.1.2. Pistonlu pompalar

Pistonlu pompalar ise küçük hacimli üç veya daha fazla silindirden ve bir ana (krank) milden oluşur (Şekil 2.4). Bunların çalışma prensibi pistonlu motorlarda veya pistonlu hidrolik pompalarda olduğu gibidir fakat silindir içine düşük basınçlı su alınarak, bu su en çok 300 MPa'a kadar çıkarılabilmektedir.



Şekil 2.4. Pistonlu pompa sistemi (http://www.omax.com/tech101_b.php#B2)

Bu tip pompalarda basınç değişimleri kesme işlemlerini etkilemeyecek kadar düşük olduğundan basınç düzenleyici sistemine gerek kalmaz. Ayrıca daha düşük çalışma basınçları nedeniyle de bakım gereksinimleri diğer tip pompalara göre daha azdır. Aşınmaları en aza indirmek için yaklaşık olarak dakikada 600 devirle çalıştırılırlar. Su demetli kesme sistemlerinde kullanılan pompaların bir karşılaştırması Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Su demeti oluşturmada kullanılan pompaların karşılaştırması (Geren ve Tunç, 2001; Akkurt, 2002).

Etkili Faktörler	Pistonlu Pompalar	Basınç Yükselticili Pompalar	Kademeli Basınç Yükselticili Pompalar
Pompa gücü	22 kW (30 HP)	37 kW (50 HP)	37 kW (50 HP)
Maksimum ulaşılabilir basınç	300 MPa	300-700 MPa	300-700 MPa
Basınç ayar imkanı	Zor	Kolay	Kolay
Basınç dalgalanması	Yok	15-30 MPa	Yok
Basınç düzenleyici gereksinimi	Yok	Var	Yok
Çelik için yanıl hız*	120 mm/dk	108 mm/dk	108 mm/dk
Maksimum yanıl hız	120 mm/dk	Artan basınçla artıyor	Artan basınçla artıyor
Verim	Yüksek (%95)	Düşük (%70)	Düşük (%70)
Güç sarfiyatı	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yüzey kesme kalitesi	Normal	Artan basınçla artıyor	Basınç yükselticiliye göre daha iyi
Su debisi	Yüksek	Düşük	Düşük
Makina parçalarının ömrü	Yüksek	Artan basınçla azalıyor	Artan basınçla azalıyor
Sızdırmazlık elemanı ömrü	Normal	Artan basınçla azalıyor	Artan basınçla azalıyor
Bakım gereksinimi	Düşük	Artan basınçla artıyor	Artan basınçla artıyor
Gürültü	Düşük	Yüksek	Yüksek
Yatırım maliyeti	Normal	Pistonlu pompadan yüksek	Pistonlu pompadan yüksek

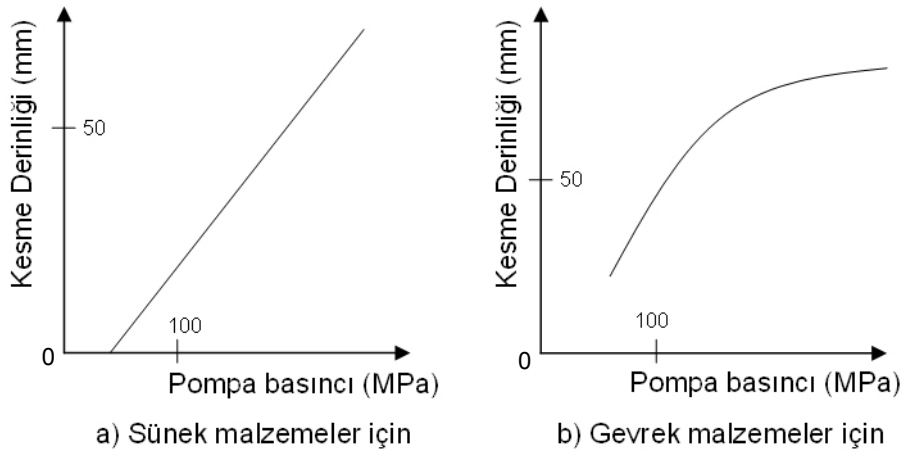
* 450 g/l aşındırıcı beslemesi, 0.35 mm’lik su püskürtme memesi kullanımı ve 300 MPa basınç koşullarında çalışılmıştır.

Düşük basınçların yeterli olduğu durumlarda pistonlu pompaların kullanımı daha avantajlıdır. Fakat kayaç gibi sert malzemelerin kesimi gibi durumlarda yüksek basınçlar gerekeceğinden basınç yükselticili pompalardan biri tercih edilmelidir.

2.2.1.3. Pompa basıncının seçimi

Tüm kesme sistemi dikkate alındığında sistemin verimliliğini etkileyen en önemli etmen pompa basıncıdır. Pompa basıncı arttıkça kesme derinliği de belli seviyelere kadar artmaktadır.

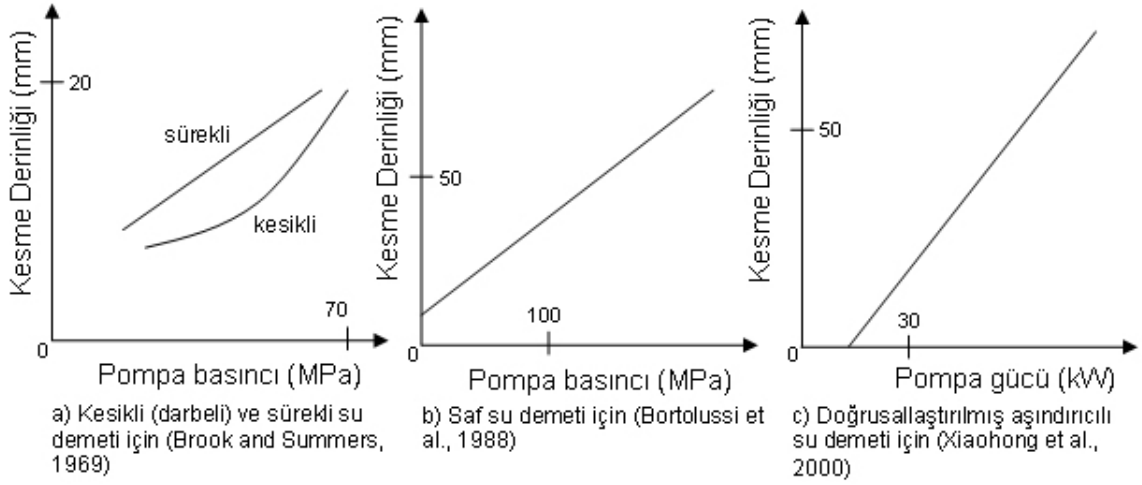
Pompa basıncıyla, su demeti oluşumu, aşındırıcı ivmelenmesi ve malzeme uzaklaştırılması arasında yüksek ilişkiler bulunmaktadır. Pompa basıncının artmasıyla Bernoulli eşitliği gereği su demetinin hızı artarken, kesme derinliği de artmaktadır. Artan pompa basıncı, demetin genişlemesine ve odaklama tüpünün aşınmasına da sebep olmaktadır. Sünek ve gevrek malzemeler için artan pompa basıncının kesme derinliği üzerindeki etkileri Şekil 2.5'de görülmektedir (Momber and Kovacevic, 1997).



Şekil 2.5. Su demeti kesiminde pompa basıncının etkisi (Momber and Kovacevic, 1997)

Pompa basıncı karışım odasında oluşan vakumu kontrol ettiği için, buraya alınacak aşındırıcı miktarını da belirlemektedir. Momentum transferi dikkate alındığında gerekli aşındırıcı kütlelerini verimli bir şekilde ivmelendirmek için su demetinin belirli bir momentuma sahip olması gerekmektedir. Bunu belirlemek için farklı pompa basınçları için kesme derinliğine karşı aşındırıcı besleme miktarı grafikleri çizilir. Buradan bulunan en uygun aşındırıcı besleme miktarları incelendiğinde artan pompa basınçlarıyla birlikte optimum aşındırıcı besleme miktarlarının da artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Değişik araştırmacıların kayaçların su demeti ve aşındırıcı su demetiyle kesiminden elde ettikleri sonuçlar Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Bazı araştırmacıların kayaçlar için geliştirdikleri pompa basıncı-kesme derinliği ilişkileri

Malzemelerin kesilebilmesi için, oluşan su demetinin malzeme içerisine nüfuz edebilmesi gerekmektedir. Su demetinin bu işi gerçekleştirebilmesi için basıncının kritik bir eşik değerinin üzerinde olması gerekir. Su demetinin malzemede ölçülebilir miktarda kesme-oyma işlemine başladığı andaki basınç değeri, sınır veya eşik basınç değeri (p_s) olarak isimlendirilmektedir. Sınır basınç değeri tam olarak malzeme özelliklerini yansıtan bir değer olmayıp diğer işlem parametreleriyle birlikte dikkate alınmalıdır. Su demetinin sahip olduğu kinetik enerjinin pompanın ürettiği mekanik enerjiye oranı hidrolik verim olarak adlandırılmaktadır. Pompa basıncı yükseldikçe suyun sıkışması ve viskozitesinin artmasından dolayı kayıplar daha yüksek olacağından hidrolik verim düşmektedir.

Su demetindeki yayılma, pompa basıncı ve debisindeki artışla birlikte artış göstermektedir. Hızla yayılan demetlerde aşındırıcı yükleme için vakum etkisi iyileşmekle birlikte, derin kesimler için uygun olmayacak şekilde enerjisi dağılmış olmaktadır.

Malzeme uzaklaştırmanın verimli olabilmesi için kesme işleminde harcanan özgül enerjinin en az olması gerekmektedir. Sınır basınç değerinin 3 katı basınç için özgül kesme enerjisi minimum, malzeme uzaklaştırma verimi en yüksek değere ulaşmaktadır.

2.2.2. Su Demeti Püskürtme Memeleri

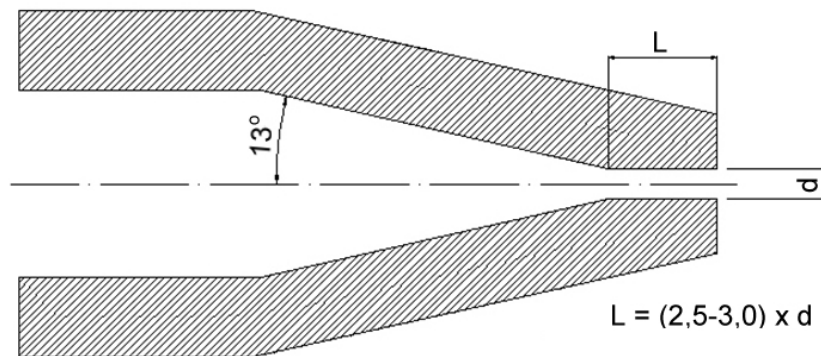
Su demetiyle kesme sisteminin, yüksek basınç pompalarından sonra en önemli parçası olan püskürtme memeleri (nozül), pompadan özel hortumlarla getirilen yüksek basınçlı suyun fişkırtıldığı elemanlardır.

Kullanım alanlarına göre kesme çalışmalarında kullanılan çok küçük boyutlu hassas yapılı püskürtme memeleri ve temizleme, kazı-parçalama çalışmalarında kullanılan nispeten büyük boyutlu püskürtme memeleri olarak iki grupta incelenebilir. Yine püskürtme memeleri, saf su demeti ve aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri olarak sınıflandırılabilir. Aslında bu iki sistemin temel farkını oluşturan unsur püskürtme memesi malzeme yapılarının farkından meydana gelmektedir.

2.2.2.1. Saf su demeti püskürtme memeleri

Saf su demeti püskürtme memelerinin yapısı püskürtme memesinin kullanım alanına ve amacına göre değişmektedir. Saf su demeti püskürtme memeleri; düşük basınç-yüksek debi püskürtme memeleri, yüksek basınç-düşük debi püskürtme memeleri ve temizleme işlemlerinde kullanılan püskürtme memeleri olmak üzere üçe ayrılabilir.

Düşük basınç – yüksek debili akış sisteminde özellikle imalatının kolay olması ve iyi sonuçlar alınması sebebiyle en çok kullanılan püskürtme memesi Şekil 2.7’de verilen “Leach and Walker“ püskürtme memesidir.

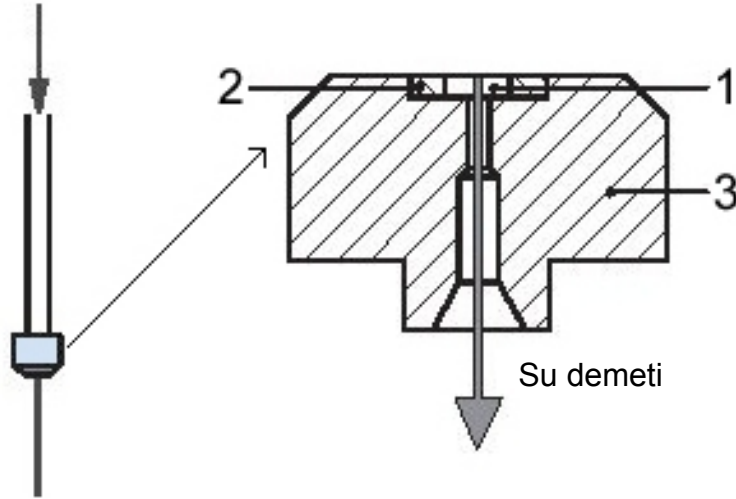


Şekil 2.7. Leach and Walker püskürtme memesinin yapısı (Leach and Walker, 1966)

Yüzeylerin istenmeyen kir, pas, boya vb. kalıntılardan temizlenmesinde kullanılan püskürtme memeleri, suyu demet şeklinden ziyade saçınımlı şekilde yüzeylere

püskürtmek amacıyla kullanılırlar. Böylece, oluşturulan daha geniş demetle daha büyük yüzeylerin temizlenmesi sağlanmış olur. Bu amaçla oval veya fan-jet püskürtme memesi kullanılmaktadır. Fan-jet püskürtme memesi geometrik olarak bir düzlem ile kesilmiş yarı küreyi andırır. Bu püskürtme memelerin kesme amacıyla kullanılan püskürtme memeleri kadar hassas olması gerekmez.

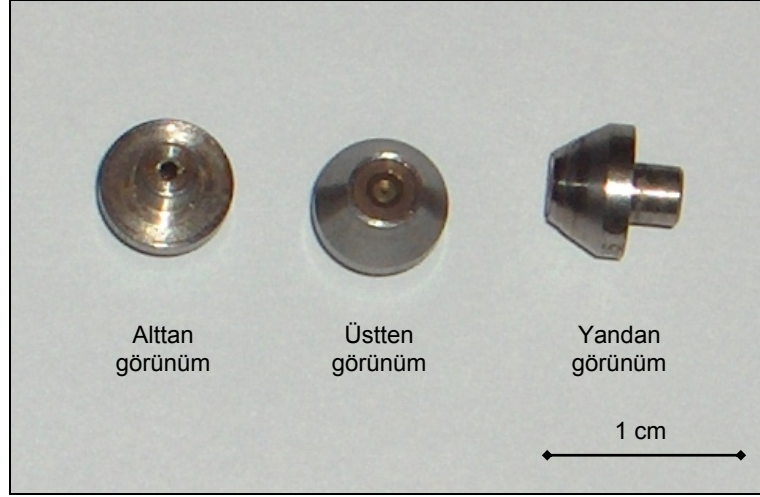
Yüksek basınç saf su demeti püskürtme memesi, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi püskürtme memesi gövdesi (3), elmas, safir vb. aşınmaya dayanıklı malzemedan yapılmış püskürtme memesi taşı (1), ve püskürtme memesi taşı yuvasından (2) oluşmaktadır. Bu tip püskürtme memelerinde yüksek basınçlı fakat az miktarda su ile demet oluşturulmaktadır. Yüksek basınçtaki suyun dar aralıktan geçmesiyle su demeti oluşur.



Şekil 2.8. Su demeti püskürtme memesinin genel yapısı (Trumpf, 1997)

Demetin çıkışına doğru içinden geçtiği boşluğun çapı, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi artmakta, böylece daha düzgün bir su demeti oluşturulmaktadır. Su püskürtme memesine gelen 400 MPa basınçtaki su, püskürtme memesi çıkışında yaklaşık 800-1000 m/s'lik bir hıza ulaşmaktadır.

Saf su demeti oluşturmada kullanılan püskürtme memesinin resmi Şekil 2.9'da verilmiştir.

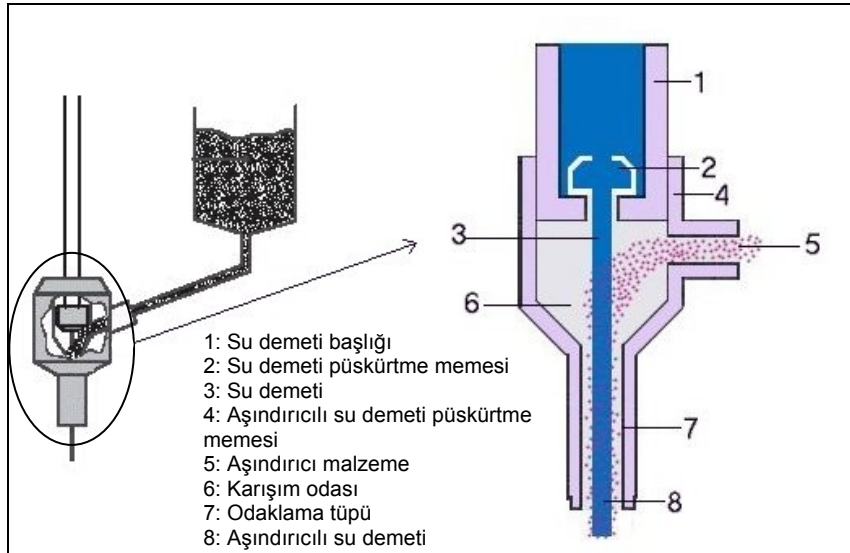


Şekil 2.9. Hassas kesim uygulamalarında kullanılan saf su demeti püskürtme memelerinin gerçek görünümü

Püskürtme memesi malzemesi, uygulanan basınca göre değişmektedir. 68 MPa basınca kadar pirinç veya çelik, 69-170 MPa basınçları arasında tungsten karbür püskürtme memeleri kullanılması önerilmektedir. 170 MPa'dan büyük basınçlarda ise safir veya elmas elemanlı püskürtme memeleri kullanılması gerekmektedir .

2.2.2.2. Aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri

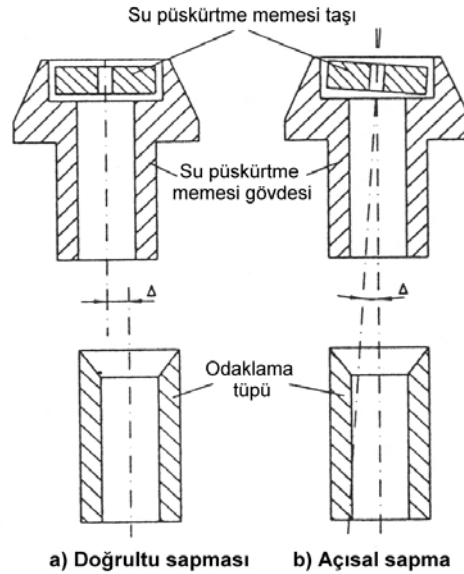
Aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri temel olarak su demeti püskürtme memesi çıkışında oluşan saf su demetine aşındırıcı eklenmesi ve böylece su demetinin kesme gücünün artırılması amacıyla geliştirilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Aşındırıcılı su demeti püskürtme memesinin genel yapısı (Trumpf, 1997)

Aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri temel olarak su demeti püskürtme memesi ile birlikte, karışım odası, odaklama tüpü ve aşındırıcı besleme kısmından oluşmaktadır. Püskürtme memesi içerisindeki karışım ve aşındırıcı girişinin verimliliğinin artırılması kesme işleminin verimliliğinin artırılmasında önemli bir etkidir.

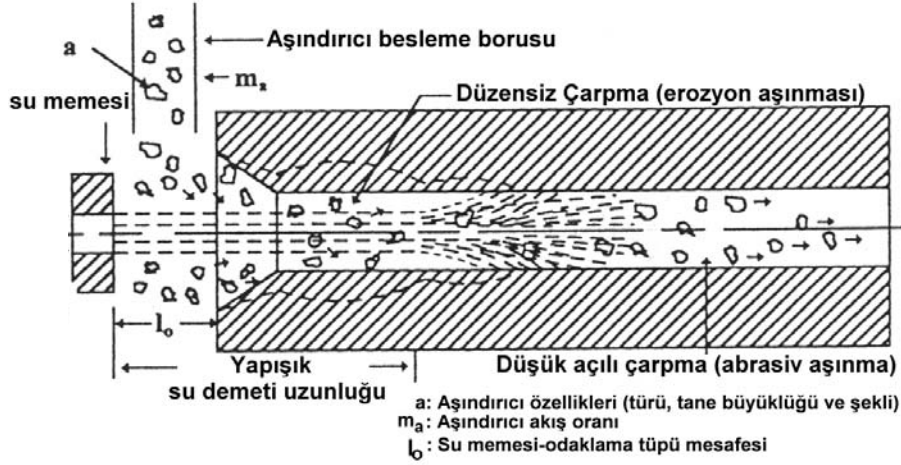
Püskürtme memesi tasarımı yapılırken, su demetindeki kinetik enerjinin mümkün olduğu kadar yüksek oranda aşındırıcılara aktarılması ve püskürtme memesi malzemesinde en az aşınmanın olması amaçlanmaktadır. Böyle bir tasarımda en önemli parametrelerden biri, su püskürtme memesi ile odaklama tüpünün merkezlerinin aynı doğrultuda konumlandırılmalarıdır. Su püskürtme memesi ile odaklama tüpünün bağlantı hataları Şekil 2.11’de verilmiştir. Böyle durumlarda iki tip sapma oluşmaktadır. Bunların ilki, odaklama tüpü ile su püskürtme memesi tutucusunun merkezlenme hatası sonucu oluşan doğrultu sapması, diğeri ise su püskürtme memesinin eğri yerleştirilmesi sonucu oluşan açısal sapmadır.



Şekil 2.11. Su püskürtme memesi-odaklama tüpü bağlantı hataları sonucu oluşan sapmalar (Singh, 1991)

Odaklama tüpünün iç çapı kesme sırasında oluşacak yarığın genişliğini belirlediğinden istenen kesme genişliğine göre çap seçilmelidir. Boyu ise içindeki aşındırıcıya gerekli ivmeyi kazandırabilecek ve gerekli odaklamayı yapabilecek uzunlukta, ayrıca içerisinden geçecek aşındırıcıya karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olmalıdır.

Aşındırıcılı su demeti içerisinde aşındırıcı tanelerin izledikleri yol ve odaklama tüpünde meydana gelen aşınmalar Şekil 2.12’de verilmektedir (Nanduri et al., 1995). Su demeti odaklama tüpüne ilk girdiği noktalarda yüksek açılarla tüpün duvarlarına çarpmakta ve aşınmalar bu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Tüp uzunluğu yeteriyse aşındırıcı taneler daha sonra paralel hareket ederek daha düşük açılarla tüp duvarlarına çarpacaktır. Dolayısıyla tüp içinde ilerledikçe aşınmada düşüş olacaktır.



Şekil 2.12. Aşındırıcılı su demeti karışımı ve odaklama tüpündeki aşınmalar (Nanduri et al., 1995)

Su demeti püskürtme memesi için elmas kullanımı ve karışım odası ile odaklama tüpünün (aşındırıcılı su demeti püskürtme memesi) yapıldığı malzemelerin kalitesindeki artış aşındırıcılı su demeti püskürtme memelerinin ömürlerini oldukça artırmıştır (Etchells, 1997). Püskürtme memelerinin ömürlerini belirleyebilmek için birçok çalışma yapılmış ve aşınma modelleri oluşturulmuştur. Taggart et al. (2001)’a göre aşınma miktarı Eşitlik 2.1’de verilmektedir.

$$W_N = (8,07 \cdot 10^{-4}) \frac{P^{0.9} d_0^{0.38} m_a^{0.7}}{d_n^{0.5} L^{0.8}} \quad (2.1)$$

Burada;

W_N : Püskürtme memesi aşınma miktarı (birim püskürtme memesi boyu için dakikada oluşan aşınma miktarı, g/dk/mm),

P : Su basıncı (MPa),

d_0 : Püskürtme memesi iç çapı (mm),

d_n : Püskürtme memesi çapı (mm),

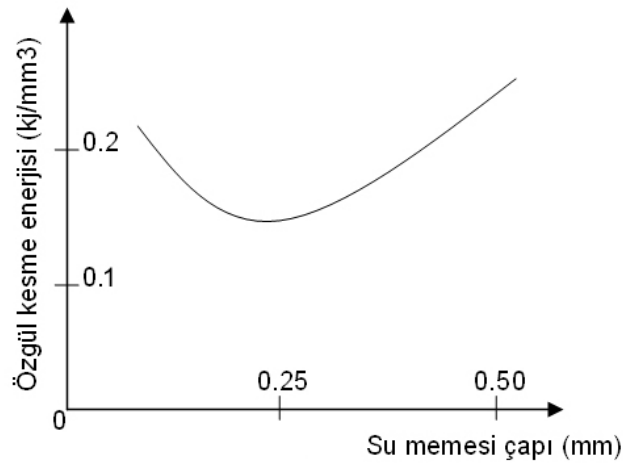
m_a : Aşındırıcı akış miktarı (g/s),

L : Püskürtme memesi uzunluğunu (mm) belirtmektedir.

Swanson et al. (1987) ve Momber (1998) aşındırıcı tanelerin ivmelenmesinde enerji kullanımı ve kinetik enerji kayıplarını incelemiş, yine Momber (2001) bir başka araştırmasında aşındırıcılı su demeti oluşumunda karışım içindeki enerji transferlerinin verimliliğini araştırmıştır. Tazibt et al. (1996) su, hava ve aşındırıcıdan oluşan su demetinin bileşimini inceleyerek, aşındırıcı tanenin ivmelenme sürecini bir matematiksel modelle açıklamıştır. Bütün bu çalışmalara rağmen, karışma odasındaki kompleks türbülans koşulları, karışma işlemini anlamayı oldukça güçleştirmektedir. Bu konuyla ilgili olarak özellikle üretici firmalar tarafından yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına günümüzde de devam edilmektedir.

2.2.2.3. Su püskürtme memesi çapının seçimi

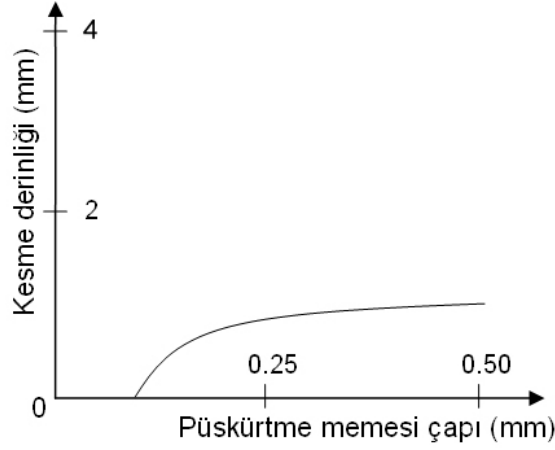
Su püskürtme memesi çapı arttıkça aşındırıcı tanelere momentum transferi daha verimli olmaktadır. Fakat çaptaki artış belirli bir sınır değere ulaştıktan sonra, tanelerin hızlanmasında önemli bir etkisi kalmamaktadır. Şekil 2.13'de sabit basınç için özgül kesme enerjisiyle su püskürtme memesi çapı arasındaki ilişki verilmektedir (Guo et al., 1994).



Şekil 2.13. Aşındırıcılı su demeti kesiminde su püskürtme memesi çapının özgül kesme enerjisine etkisi (Guo et al., 1994)

Sınır pompa basıncı gibi kesme işlemi için aşındırıcı ivmelendirmesini sağlayabilecek sınır püskürtme memesi çapından da bahsedilebilir. En uygun püskürtme memesi çapı sınır çapın yaklaşık 2,5 katı olarak belirlenmiştir.

Kayaç örneklerinde Hagan (1992) tarafından yapılan deneyler sonucunda belirlenen kesme derinliğine püskürtme memesi çapının etkisi ise Şekil 2.14'de verilmiştir.



Şekil 2.14. Kayaçlarda püskürtme memesi çapının kesme derinliğine etkisi (Hagan, 1992)

2.2.2.4. Odaklama tüpü çapı ve boyunun seçimi

Genel anlamda odaklama tüpü çapındaki artış kesme derinliğinde azalmaya sebep olmaktadır. Momentum transferinde demeti oluşturan su+hava+aşındırıcı karışımı ne kadar yoğun olursa aşındırıcıya aktarılacak enerji o kadar yüksek olacaktır. Dolayısıyla aşındırıcı ivmelenmesi de o derece verimli olacaktır. Bu durum da ancak küçük odaklama tüpü çapıyla sağlanabilir. Çok küçük odaklama çapı durumunda ise aşındırıcı+hava+su demeti karışımı verimli bir şekilde gerçekleşemediği için yine aşındırıcıya istenen ivme kazandırılmamaktadır. Aslında sadece odaklama tüpü çapı kendi başına bir anlam ifade etmektedir. Karışım odasındaki ivmelenme olayının veriminin gelen su demetinin çapıyla da ilişkisi bulunmaktadır. Araştırmacılar bu görüşten hareketle odaklama tüpü çapı ile su püskürtme memesi çapı arasında $d_{fopt}=(3-4)d_o$ ve odaklama tüpü çapı ile tane çapı arasında $d_{fopt}=3d_p$ ilişkileri olduğunu tespit etmişlerdir (Mazurkiewicz et al., 1988).

Odaklama tüpü boyundaki artışla birlikte başlangıçta kesme derinliği de doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum, enjekte edilen aşındırıcı tanelerin ivmelenmesi için gerekli mesafe ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu kritik mesafe geçildikten sonra, aşındırıcı hızında daha fazla artış gözlenmez, fakat bu durumda, yayılan su demetinin cidarlara sürtünmesi etkisiyle kesme derinliğinde bir düşmeye sebep

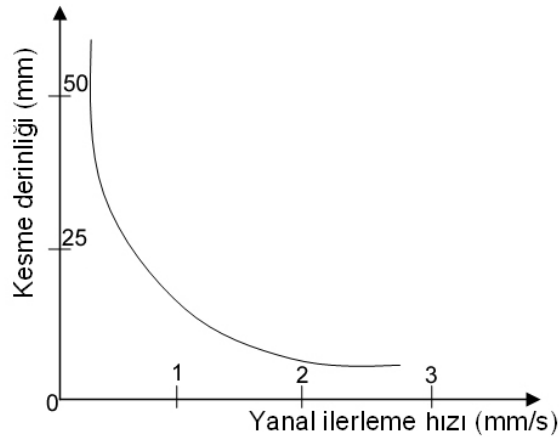
olacak şekilde aşındırıcı hızını azaltır. Optimum odaklama tüpü boyu veya diğer bir ifadeyle optimum ivmelendirme mesafesi büyük oranda aşındırıcı malzeme yoğunluğuyla ilgilidir. Daha ağır taneler için daha büyük mesafeler gerekecektir. Aşındırıcı tüketimi açısından bakıldığında uzun odaklama tüpleri tavsiye edilmektedir.

Akışkanlar dinamiği deneyleri ve aşındırıcılı su demetli kesme deneyleri sonuçları, optimum kesme sonuçları elde etmek için, odaklama tüpü boyu ile çapı arasındaki ilişkiyi Eşitlik 2.2'de verilen şekilde ifade etmiştir (Momber and Kovacevic, 1998):

$$L_{F_{opt}} = (25 - 50) \cdot d_F \quad (2.2)$$

2.2.2.5. Püskürtme memesi yanal hızının seçimi

Yanal hız terimi, püskürtme memesinin kesim sırasında yatay düzlemde birim zamandaki ilerleme miktarını ifade etmektedir. Yanal hız ile kesme derinliği arasında karakteristik bir ilişki bulunmaktadır (Şekil 2.15). Düşük yanal hızlar için kesme derinliği önemli artış gösterirken, yüksek yanal hızlarda kesme derinliği bir doyum noktasına hatta sıfır noktasına yaklaşmaktadır.



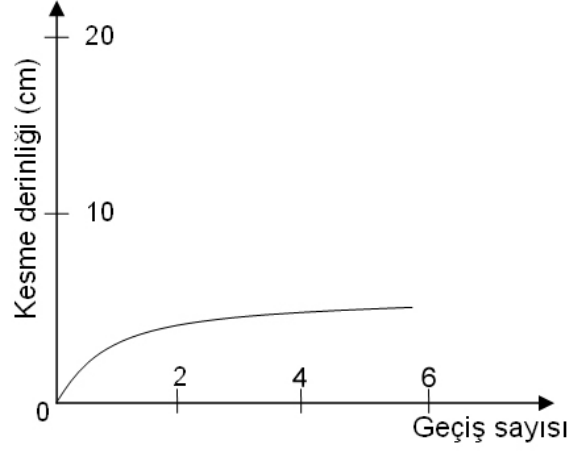
Şekil 2.15. Aşındırıcılı su demeti kesiminde yanal hızın kesme derinliği üzerine etkisi (Brandt et al., 1994)

Karışıklı aşındırıcılı su demetiyle yapılan kesme deneylerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir (Walters and Saunders, 1991). Kayaç kesme deneylerindeki ilişkiler de aynıdır (Summers, 1972; Hagan, 1992; Xiaohong et al., 2000).

2.2.2.6. Püskürtme memesi geçiş sayısının seçimi

Geçiş sayısı, çok aşamalı kesme işlemi tanımlar. Demetin bir noktaya uygulanma süresi arttıkça su birikmesi ve sürtünme etkisiyle kesme derinliği

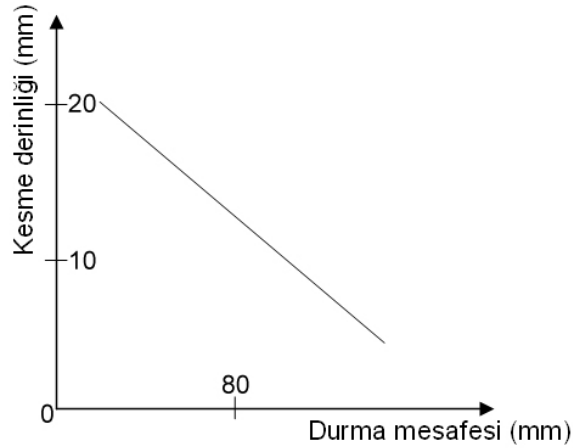
artışında bir yavaşlama olmaktadır. Kesme hızını yüksek tutup, kesme işlemini birkaç geçişle yapmak daha verimli olmaktadır. Kayaç numuneleri için geçiş sayısı ile kesme derinliği arasındaki ilişkiye bir örnek Şekil 2.16'da verilmektedir.



Şekil 2.16. Kayaç kesiminde geçiş sayısı – kesme derinliği ilişkisi

2.2.2.7. Püskürtme memesi durma mesafesinin seçimi

Durma mesafesi, su püskürtme memesinin kesilen malzeme ile arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Aşındırıcılı su demetiyle kesmede, durma mesafesinin (püskürtme memesi-malzeme arası mesafe) kesme derinliği üzerindeki etkisini ilk olarak Barton (1982) araştırmıştır. Barton (1982) durma mesafesindeki artışla, kesme derinliğinde doğrusal bir azalma olduğunu belirlemiştir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Su demeti kesiminde durma mesafesinin kesme derinliğine etkisi (Barton, 1982)

Chung et al. (1992), Kovacevic (1992) ve Guo et al. (1994) yaptıkları çalışmalarla (Barton, 1982) tarafından elde edilen sonuçla benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Liu et al. (1992) ve Brant et al. (1994) karışımli aşındırıcılı su demetiyle yaptıkları

çalışmalarda, Bortolussi et al. (1988), kayalarda yaptığı aşındırıcılı su demetli kesme deneylerinde de benzer sonuçları tespit etmişlerdir. Durma mesafesi, aşındırıcı tanelerin hızını önemli ölçüde etkilemese de, su demetinin genişlemesi nedeniyle kesme alanı genişleyecek ve kesme derinliği azalacaktır.

2.2.2.8. Kesme açısının seçimi

Barton (1982) ve Hashish (1993) yaptıkları çalışmalarda sünek malzemeler için oluşan kesme açıları ile kesme derinlikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Çelik ve alüminyumun aşındırıcılı su demetiyle kesilmesi sırasında 75-80°'lik kesme açılarında maksimum kesme derinliği gözlemişlerdir. Buna karşılık gevrek malzemeler üzerinde yapılan çalışmalarda 90°'lik kesme açılarında maksimum kesme derinliğinin elde edildiği tespit edilmiştir.

2.2.3. Aşındırıcı Malzemeler ve Özellikleri

Nispeten daha sert ve dayanıklı malzemelerin kesilip işlenmesinde kullanılan aşındırıcılı su demetinin kesme gücünü belirleyen önemli unsurlardan biri kullanılan aşındırıcı malzemelerdir. Aşındırıcılı su demetiyle kesme uygulamalarında çok farklı türde aşındırıcı malzemeler kullanılmaktadır. Kullanılan aşındırıcı ürünlerin başında %90 gibi bir oranla granat minerali gelmektedir. Bunu, olivin, cüruf, alüminyum oksit ve silis kumu izlemektedir (Martinec, 1992). Aşındırıcılı su demetiyle kesme uygulamalarında kullanılan aşındırıcılar oksitler ve silikatlar olarak iki grupta incelenmektedir (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. Aşındırıcı malzemelerin sınıflandırılması

Oksitli Mineraller	Silikatlı Mineraller	
	Granat Grubu Mineraller	Diğer Silikatlar
Manyetit	Almandin	Zirkon
İlmenit	Spesartit	Topaz
Korund	Pirop	Olivin
Rutil	Grosular	Staurolit
	Andradit	Kuvars

Aşındırıcı malzemelerin seçiminde dikkat edilen en önemli hususlar; aşındırıcı malzemelerin sertliği, yoğunluğu, mekanik davranışı, tane şekli, tane boyu dağılımı ve ortalama tane büyüklüğüdür. Aşındırıcılı su demetinde kullanılan aşındırıcı

malzemelerin değerlendirilmeleri için Agus et al. (1995) tarafından bir model geliştirilmiştir. Buna göre bir aşındırıcı malzemenin gücü Eşitlik 2.3'de verilmektedir.

$$P_{abr} = H_p^{a_1} \cdot S^{a_2} \cdot \rho_p^{a_3} \cdot d_p^{a_4} \cdot m_A^{a_5} \quad (2.3)$$

Burada;

P_{abr} : Sistemde kullanılan aşındırıcı malzemenin gücü,

H_p : Aşındırıcı malzemenin Knoop sertliği,

S : Aşındırıcı tanenin şekil faktörü,

ρ : Aşındırıcı malzemenin yoğunluğu,

d_p : Aşındırıcı tanenin çapı,

m_A : Aşındırıcı akış miktarıdır.

Burada hesaplanan aşındırıcı malzemenin gücü ile oluşan demetin birim aşındırma kapasitesi arasında doğrusal ilişki mevcuttur. Eşitlik 2.3'de verilen üssel katsayılar ise kesilecek veya işlenecek malzemeye göre belirlenmiş ve bir çizelge halinde hazırlanmıştır (Çizelge 2.4).

Çizelge 2.4. Aşındırıcı malzeme gücü eşitliğindeki katsayılar (Agus et al.; 1995)

Kesilen Malzeme	Üssel İfadeler				
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Granit	1.4	0.2	-0.4	0.1	-0.5
Porfirik kayaç	1.5	-0.1	-0.2	0.1	-0.5
Bazalt	1.2	0.7	-0.2	0.1	-0.5
Mermer	0.7	2.0	-0.2	0.1	-0.5

Buradan görülebileceği gibi aşındırıcı malzemenin sertliği ve tane şekil faktörü kesme işleminde en önemli etkiye sahip bileşenlerdir. Sert kayaç kesiminde aşındırıcı sertliği önemli faktör iken, daha yumuşak malzemelerin kesiminde tane şekli önem kazanmaktadır.

2.2.3.1. Aşındırıcı malzemelerin yapısı

Aşındırıcı malzemelerin kristal kafes yapısı, kristal sınıfı ve simetrisi, kimyasal bileşimi, katı-gaz-mineral kapanımları, dilinimlenmesi vb. konuları kapsamaktadır. Kristal yapısı, aşındırıcının kırılıp öğütülerek istenen boyutta sınıflandırılması sırasında tane şeklini belirleyen unsurlardan biri olması sebebiyle önemlidir. Diğer

mineralojik özellikleri aşındırıcı tanelerin tıkkılık ve darbe dayanımlarını belirlemede etkili olabilmektedir. Ayrıca kullanılacak aşındırıcı malzemeler kimyasal bileşimi, sağlık ve çevre bakımından sorun yaratma ihtimali açısından değerlendirilmelidir.

2.2.3.2. Aşındırıcı malzemelerin sertliği

Sertlik, uygulamada aşındırıcı gücünü en çok etkileyen faktör olması sebebiyle çok önemlidir. Aşındırıcılar gibi gevrek malzemelerin sertliğinin belirlenmesinde iki yöntem izlenmektedir. Bu yöntemler; Mohs sertlik değeri olarak bilinen çizik testi veya Knoop ve Vickers sertlik değerlerinde kullanılan batırma veya çentik testidir.

Bilindiği gibi Mohs sertlik ölçeğinde 10 mineral temel alınmıştır. Bu sıralama bir üst sıradaki mineralin bir alt sıradaki minerali çizebilmesi prensibiyle oluşturulmuştur. Knoop sertliğinde ise elmas bir piramit uç belli bir yükü, sertliği belirlenecek malzeme üzerine batırılmakta ve uygulanan yükün oluşan piramit izinin köşegen uzunluğuna bölünmesiyle de sertlik değeri hesaplanmaktadır. Knoop ve Vickers sertlikleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Diğer sertlik değerleri arasında da çeşitli ilişkiler araştırılmış ve farklı eşitlikler geliştirilmiştir. Bazı aşındırıcı malzemelerin sertlikleri Çizelge 2.5'de verilmektedir.

Çizelge 2.5. Çeşitli aşındırıcı malzemelerin sertlik değerleri (Harben, 1978; Wellborn, 1996)

Aşındırıcı Malzeme veya Mineral	Kimyasal Bileşimi	Mohs Sertliği	Knoop Sertliği
Elmas	C	10	8000
Kübik Boron Nitrit	BN	9.9	7800
Boron Karbit	BC	9.7-9.8	2760
Silisyum Karbür	SiC	9.5-9.6	2480
Korund	Al ₂ O ₃	9-9.4	2150
Zımpara	SiO ₂ FeOAl ₂ O ₃	7-9	1800
Demir Atım	Fe	8.5	1690
Granat	Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	7.5-8	1360
Staurolit	MgFeAl Silikat	7-7.5	844
Kuvars	SiO ₂	7	820
Olivin	(MgFe) ₂ SiO ₄	6-7	690
Cam Boncuk	SiO ₂	5-5.5	515

Kesme derinliği artan aşındırıcı sertliğiyle birlikte artmakla birlikte bu artış özellikle sünek malzemelerin işlenmesinde daha fazla etkili olmaktadır. Belli bir sertliğin

üzerindeki aşındırıcı malzemeler için sertlik değeri kesme süreci üzerinde pek bir önem taşımazken püskürtme memesi parçalarındaki aşınmaları fazlasıyla artırabilmektedir.

Aşındırıcı malzeme sertliği; aşındırıcı tanelerin kırılma davranışını da etkilemektedir. Daha sert malzemeler için parçacık kırılma ihtimali daha yüksektir. Bu yüzden, karıştırma ve ivmelendirme süreci sırasında sert aşındırıcı taneciklerin keskin köşeli parçacıklar halinde kırılması, sünek malzemelerde mikro kesme mekanizması oluşumuna katkıda bulunur.

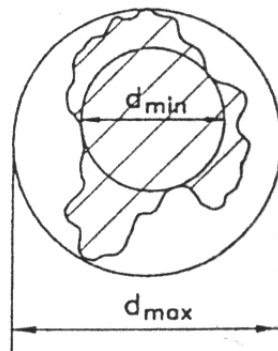
2.2.3.3. Aşındırıcı malzemelerin şekil özellikleri

Şekil faktörleri, tek bir aşındırıcı tanenin şeklini matematiksel olarak ifade etmek için geliştirilmiş sayılar ve eşitliklerdir. Tane şekli genellikle en, boy ve kalınlık değerlerinin birbirlerine oranları ve geometrik formu ile ifade edilmektedir.

Hacimsel şekil faktörü ile ifade edilen tanenin geometrik yapısı (geometrik şekil faktörü), tanenin ideal geometrik şekle ne kadar yaklaştığının bir ölçüsüdür. Şekil faktörü (F_{ξ}) Eşitlik 2.4'den yararlanılarak hesaplanabilmektedir.

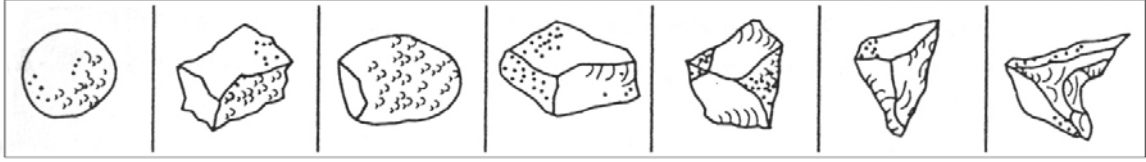
$$F_{\xi} = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.6'da kullanılan değişkenler Şekil 2.18'de verilmektedir.



Şekil 2.18. Aşındırıcı taneler için şekil faktörü hesabında kullanılan değişkenler

Vasek et al. (1993), aşındırıcı granat taneleri için Şekil 2.19'da verilen 7 farklı tane şekli önermişlerdir. Ayrıca, granat mineral türüne göre aşındırıcı tane şekil faktörünün değişimini de Çizelge 2.6'daki gibi belirlemişlerdir.



Şekil 2.19. Aşındırıcılı su demetli kesme işleminde kullanılan aşındırıcı granat tanelerinin tipik şekilleri

Çizelge 2.6. Granat mineral türlerine göre şekil faktörünün değişimi

Mineral Türü	Şekil Faktörü (F_s)
Almandin	0,64—0,67
Grossular	0,70
Andradit	0,65-0,68

Bahadır and Badruddin (1990) yaptıkları bir çalışma ile tane boyu değişimi ile aşındırıcı türüne göre farklı olmakla birlikte tane şeklinde de değişiklik olduğunu göstermiştir. Aşındırıcı tanelerin şekli üzerinde yapılan birçok çalışma tane şeklinin kesme mekanizmasını belirlemede en önemli unsurların başında geldiğini göstermektedir.

Sünek malzemelerde tane şeklinin keskin köşeli olması kesme derinliği üzerinde olumlu etkiye sahipken kayaç ve benzeri gevrek malzemelerde küresel taneler daha verimli olmaktadır. Bunun sebebi, sünek malzemelerde mikro kesme mekanizması etkiliyken gevrek malzemelerde sürekli tane darbesiyle oluşan gerilme birikmelerinin daha etkili olmasıdır.

2.2.3.4. Aşındırıcı malzemelerin tane büyüklüğü ve tane boyut dağılımı

Aşındırıcı malzemelerin tane büyüklüğü su demetli kesme sisteminde aşındırıcının gücünü belirleyen önemli unsurlardan biridir. Tane büyüklüğü veya tane çapı kavramı genelde birçok şekilde ifade edilmektedir. Burada tanenin şekli tam küre olmadığından sözü edilen çap ifadesi de aslında eşdeğer kürenin çapı olmaktadır. Tane çapı eğer büyükse inç ve mm, küçük boyutta ise mikrometre (μm) ve nanometre birimleriyle ifade edilmektedir.

Aşındırıcılı su demeti ile kesme işleminde, tane boyu, standard Tyler elek serilerine göre meş (#) olarak verilmektedir. Tyler elek açıklıkları (meş) ile ortalama tane çapları arasında Eşitlik 2.5'de verilen bir ilişki bulunmaktadır.

$$d_p = 17,479 \text{ meş}^{-1.03315} (R^2=0.998) \quad (2.5)$$

Aşındırıcılı su demetiyle kesme işlemlerinde 50#, 60#, 80# ve 100#'lik aşındırıcılar kullanılmakla birlikte dünyada ve ülkemizde büyük çoğunlukla 80#'lik aşındırıcılar (~250µm) tercih edilmektedir.

İnce öğütülmüş malzemelerin tane boyutu dağılımını matematiksel olarak ifade etmek için birçok model geliştirilmiştir. Bu modeller ampirik ifadeler olup boyut dağılımını yansıtabilmeleri ile orantılı olarak geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Bu eşitliklerin tümü Eşitlik 2.6'da verilen genel formun farklı biçimleridir.

$$M_0(d_p) = f\left(\frac{d_p}{d^*}\right)^n \quad (2.6)$$

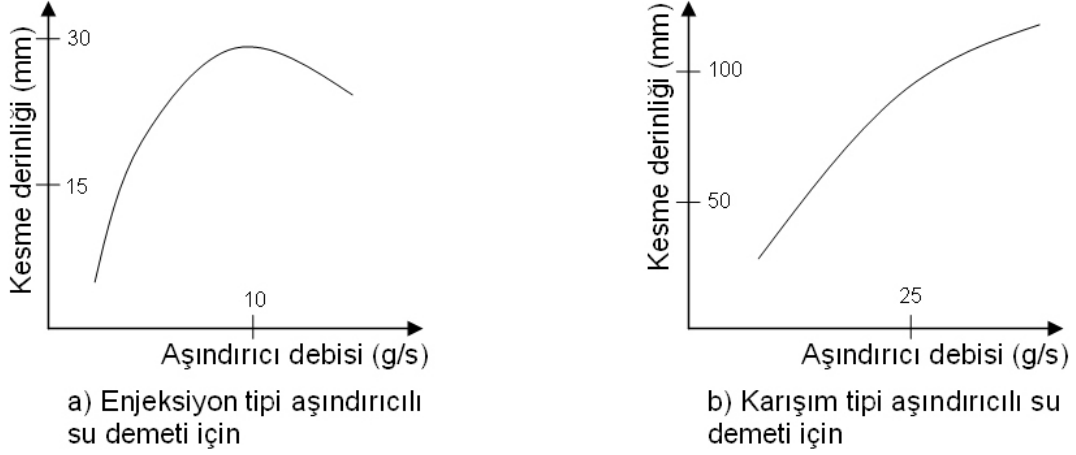
Burada; d^* , boyut modülü olarak ifade edilir ve ortalama tane çapını göstermektedir. Eşitlik bir üst boyut limitine sahipse d^* , dağılımın maksimum tane büyüklüğünü verir. Yukarıdaki eşitlik ikinci bir parametre daha içerir, n , dağılım modülü olup tane boyu dağılımının yayılımını göstermektedir. “ n ” değeri arttıkça tane boyu dağılımı daha homojen ve dar aralıkta olmaktadır.

Tane boyu dağılımının belirlenmesi kadar bu dağılımı özetleyecek bir ortalama tane çapının belirlenmesi de oldukça önemlidir. Elek analizinden bir örneğin tane boyut dağılımı biliniyorsa birkaç ortalama tane çapı değeri hesaplanabilir. Orta tane çapı (medyan) (d_{50}), kümülatif dağılım eğrisinde %50 noktasına gelen değerdir. Geometrik ortalama tane boyu ise dağılımdaki en büyük çap ile en küçük çap değerinin ortalamasıdır. Bir diğer çap ise istatistiksel çap olarak tanımlanmaktadır ve Eşitlik 2.7'de verilmektedir.

$$d_{Pst} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \cdot d_{Pi})}{100} \quad (2.7)$$

Aşındırıcı debisi, taneciklerin kinetik enerjilerini olduğu kadar çarpma etkisi yaratan parçacık sayısını da belirler. Daha yüksek debiler, karışma ve kesme sürecinde daha fazla sayıda parçacık içerir. Nispeten küçük debiler için, debideki artış kesme derinliğinde kısmi bir artışa sebep olur. Daha yüksek debiler için, karışım odasında parçacık çarpışmaları ve benzeri bazı sönümlenme mekanizmaları gelişir. Ayrıca,

su demetinin kinetik enerjisi çok fazla parçacık üzerine dağıldığında tek bir tanenin kinetik enerjisinde azalma gerçekleşir. Kesme derinliği, optimum kütleli aşındırıcı debisinde maksimum olmaktadır (Şekil 2.20). Kayaç türü malzemeler için benzer ilişki mevcuttur.

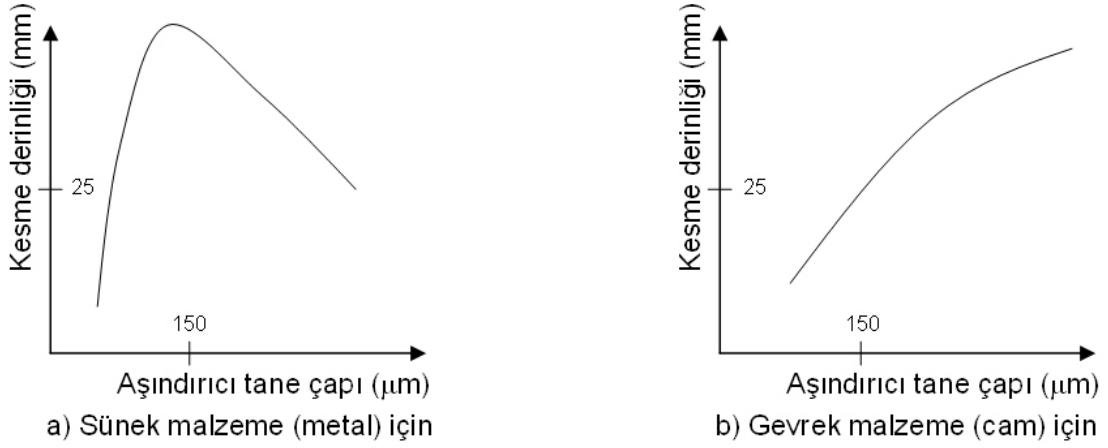


Şekil 2.20. Aşındırıcı debisi-kesme derinliği ilişkisi (Momber and Kovacevic, 1998)

Aşındırıcı tane çapı ile kesme derinliği arasındaki ilişki Eşitlik 2.8'de verilmektedir.

$$h(d_p) = C_{14} \cdot d_p^{C_{15}} \cdot \exp(C_{16} \cdot d_p) \quad (2.8)$$

Bu eşitlik dört farklı aralıkta değerlendirilmektedir. Küçük parçacık çapları için $C_{15}=1$ ve $C_{16}=0$ 'dır. Bu şartlarda, aşındırıcı tane çapı ile kesme derinliği arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Bunun sebebi daha büyük tanelerin daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmasıdır ($E_k=d_p^3$). Diğer yandan, tanecik sayısı artan tane çapıyla birlikte azalacaktır. İkinci aralıkta $0 < C_{15} < 1$ ve $C_{16}=0$ 'dır. Bu aralıkta azalan darbe sayısı nedeniyle fonksiyonun gelişimi düşer. Tek bir tanenin kinetik enerjisi ile darbe yapan tane sayısı arasındaki optimum denge aşılmaktadır. Üçüncü aralıkta ise, optimum şartlar mevcuttur ($C_{15}=C_{16}=0$ 'dır) ve maksimum kesme derinliği $h_{maks}=C_{14}$ değerine ulaşılır. Bu aralığın yeri ve genişliği, işlem parametreleri kadar işlenen malzemeye de bağlıdır (Şekil 2.21). Gevrek davranış gösteren malzemeler için nispeten geniş olan aralık, malzeme grubunun darbe frekansına daha az duyarlı olduğunun bir göstergesidir. Bu aralık, kesme derinliğinde önemli bir etki oluşturmadan kesme kalitesi üzerinde etkili olmayı sağlar. Son aralıkta aşındırıcı tane çapındaki artışla birlikte kesme derinliği azalır. Bu durum düşen darbe frekansı ve düşen tane hızlarının bir sonucudur (Nakamura et al., 1989; Gua et al., 1992; Momber et al., 1996).



Şekil 2.21. Aşındırıcı tane çapı-kesme derinliği ilişkisi

Şekil 2.21’de verilen eğrilerin yapısı püskürtme memesi yanal hızına karşı oldukça duyarlıdır. Foldyna and Fialova (1989) kaya kesme deneylerinde iri tanelerin pozitif etkisinin yüksek yanal hızlarda tamamen ortadan kalktığını tespit etmişlerdir. Aşındırıcı tane sayısının kesme işleminde etkili olabilmesi için gereken sayıdan çok düşük olduğu sonucuna varmışlardır. Aşındırıcı tane çapının kesme derinliği üzerindeki etkisi aşındırıcı debisiyle de ilişkilidir. Büyük aşındırıcı taneler kesme derinliği için optimum aşındırıcı debisi üzerinde önemli bir etkiye sahipken küçük aşındırıcı taneler aşındırıcı debisindeki değişikliğe karşı duyarlı değildirler.

2.2.3.5. Aşındırıcı malzeme ilave yöntemleri

Aşındırıcılı su demeti oluşturulurken aşındırıcı tanelerin bir şekilde su demeti içine ilave edilmesi ve böylece yüksek hızlı su demeti yardımıyla ivmelendirilerek gereken aşındırma-kesme gücüne sahip olması amaçlanmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesinde iki temel yöntem izlenmektedir.

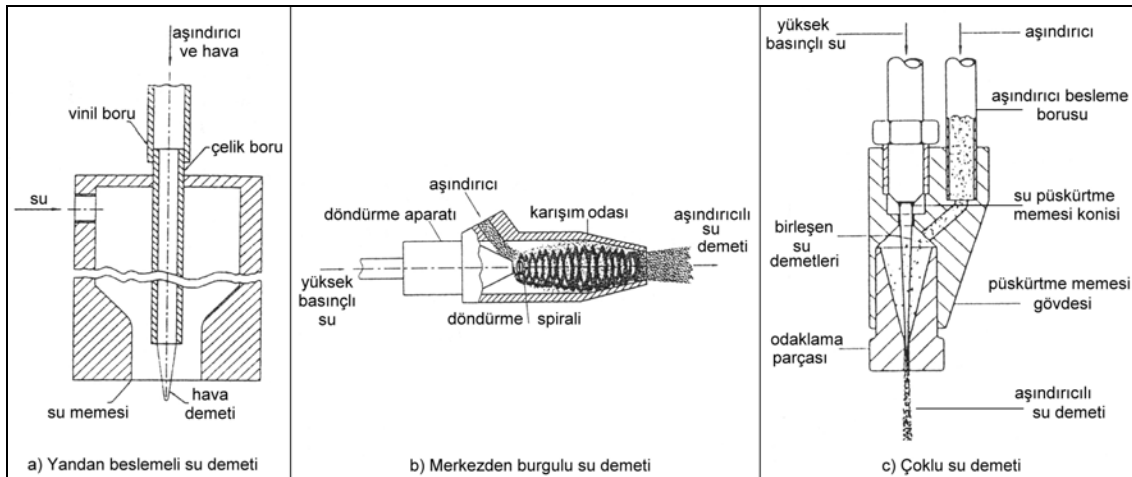
Birincisi; bu çalışma kapsamındaki benzer şekilde ‘enjeksiyon tipi’ adı verilen aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri kullanılarak su demeti çıkışına aşındırıcı eklenmesi ve aşındırıcı+su karışımının bir tüpten geçirilerek odaklandırılması ve ivmelendirilmesiyle aşındırıcılı su demetinin elde edilmesidir. Bu püskürtme memelerinde, su demeti karışım odasından (enjeksiyon odası) geçip odaklama tüpü içerisine girerken karışım odasında bir vakum etkisi oluşturur. Bu etkiyle karışım odasına bağlı aşındırıcı besleme hattından 0,3-3 m³/h miktarında hava ile birlikte aşındırıcı taneler de alınır (Akkurt, 2002). Taşınan hava

ve aşındırıcı, karışım odasında su demetiyle birleşip ivmelendirilerek odaklama tüpünden geçer ve böylelikle aşındırıcılı su demeti oluşturulmuş olur.

Karışım odasının tasarımı, oluşan vakum etkisiyle karışım odasına giren aşındırıcı tanelerin su demetiyle süratle birleşip odayı terk etmesini sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Aksi takdirde, karışım odasında biriken aşındırıcı taneler odaklama tüpünün girişini tıkayıp su demetinin geri tepmesine neden olacaktır. Bu durumu engellemek için aşındırıcı besleme kanalından basınçlı hava verilmesi ise kesme işlemini olumsuz yönde etkileyecektir.

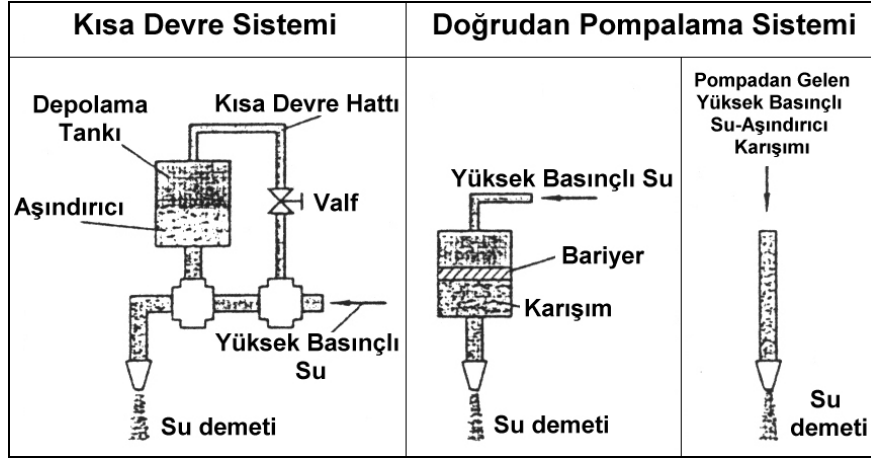
Bu tip püskürtme memelerinde en iyi sonucu alabilmek için, su püskürtme memesi çapı, odaklama tüpü çapı, karışım odası geometrisi, odaklama tüpü boyu, su püskürtme memesi ile odaklama tüpü girişi arası mesafe, aşındırıcı girişi ile odaklama tüpü arası mesafe, su püskürtme memesi ile odaklama tüpünün merkezlenmesi en iyi şekilde ayarlanmalıdır. Bu konudaki araştırmalar günümüzde de yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Daha farklı enjeksiyon tipi aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri da aşındırıcı karışımını sağlamak için kullanılmaktadır. Bu püskürtme memelerinden bazı örnekler Şekil 2.22'de görülmektedir.



Şekil 2.22. Alternatif enjeksiyon tipi aşındırıcılı su demeti püskürtme memeleri (Yie, 1984; Horii et al., 1991; Liu, 1991)

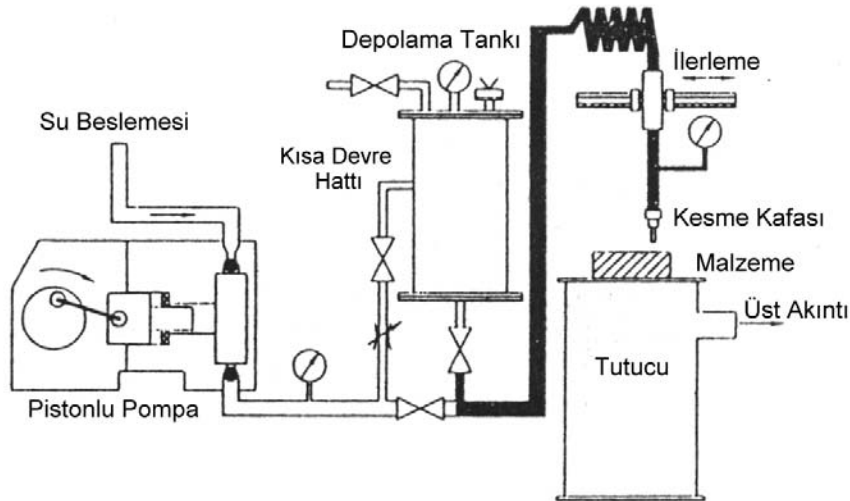
İkinci yöntemde ise; aşındırıcı ve su sistemde önceden karıştırılıp bir karışım (süspansiyon) haline getirilmekte ve daha sonra bu karışım püskürtme memesine gönderilerek aşındırıcılı su demeti oluşturulmaktadır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Karışimli su demetlerinde aşındırıcı ilave yöntemleri (Brandt et al., 1994)

Karışimli su demeti sisteminde aşındırıcı+su karışımı ya doğrudan pompalanarak püskürtme memesine iletilir (doğrudan pompalama sistemi) ya da basınçlı su pompayla üretilerek bu basınç, aşındırıcı+su karışımına aktarılır ve sonuçta oluşan yüksek basınçlı aşındırıcı+su karışımı püskürtme memesine iletilir (kısa devre sistemi).

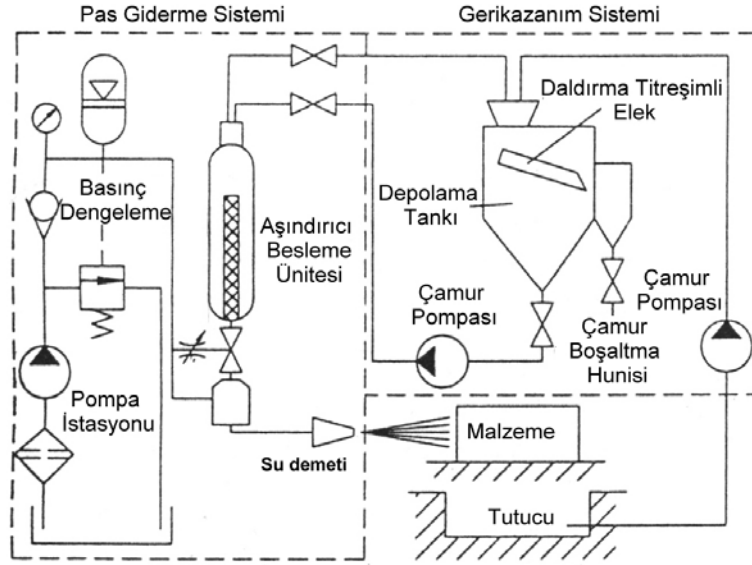
Kısa devre sisteminde, basınçlı suyun bir kısmı aşındırıcı malzemenin bulunduğu ortamdan taşınarak ana iletim hattına karıştırılmasında kullanılır. Şekil 2.24'de önceki kısa devre sistemlerinin (DIAJET) genel yapısı görülmektedir.



Şekil 2.24. Kısa devre prensibiyle çalışan karışimli su demeti düzeneği (Fairhurst et al., 1986)

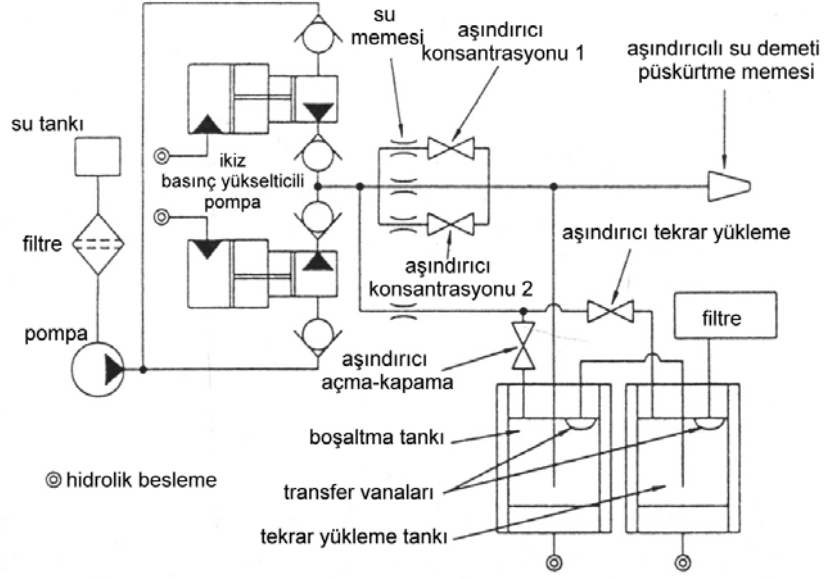
Bu makine düzeneği, pistonlu pompa, yüksek basınca dayanıklı aşındırıcı depolama tankı, kısa devre hattı ve aşındırıcı püskürtme memesinden

oluşmaktadır. Pompadan gelen basınçlı su üç kısma ayrılır. Bunlardan debi olarak büyük orana sahip olan ilk kısmı aşındırıcı karışım tankına gider. İkinci kısmı ise tanktan gelen karışımı arkadan itmek için kullanılır. Üçüncü kısmı ise tankın en üstüne uygulanarak geniş aşındırıcı kolonuna basınç uygulanması sağlanır. Burada incelenen temel problem aşındırıcının nakli ve akış miktarının kalibrasyon ve kontrolüdür. DIAJET sisteminin bir gelişmiş modeli PREMAJET de Şekil 2.25’de verilmiştir.



Şekil 2.25. Kısa devre prensibiyle çalışan aşındırıcı su demeti sistemi (Liu and Cui, 1998)

Direk pompalama sistemiyle çalışan bir karışım aşındırıcı su demeti sisteminin temel yapısı Şekil 2.26’da verilmiştir. Bu sistemde, önceden hazırlanmış karışım şeklindeki aşındırıcı+su karışımı, yüksek basınçlı suyun içine pompalanmasıyla bir basınç tankına beslenir. Verilen bu su ile oluşturulan karışımın birbirine karışmaması için araya bir engel koyulmaktadır. Tank içerisindeki aşındırıcıların su içerisinde asılı kalmalarını sağlamak ve çökelmelerini önlemek amacıyla bu sistemlerde genellikle yüksek viskoziteye sahip katkı maddeleri kullanılmaktadır. Hashish (1991) yapmış olduğu kesme çalışmalarında bu katkı maddelerini kütlece %3 oranında kullanmış ve olumlu sonuçlar aldığını belirtmiştir. Hollinger and Mannheimer (1991) yapmış oldukları bir çalışmada çeşitli katkı maddelerini karşılaştırmışlardır. Metil-selüloz çözeltisi ve polimerik “süper su” çözeltilerini kütlece %1.3-3.9 oranında karıştırmışlar ve olumlu sonuçlar elde etmişlerdir.



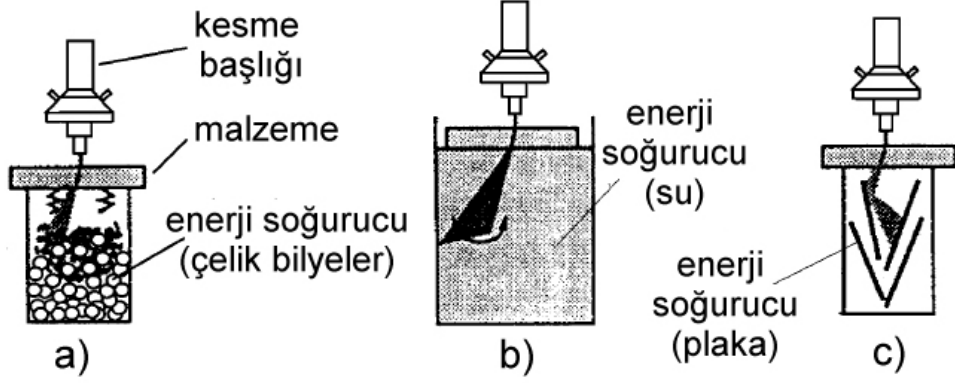
Şekil 2.26. Doğrudan pompalama ilkesiyle çalışan su demeti sistemi (Hashish, 1991)

İki sistemin yapıları farklı olduğu gibi elde edilen basınçlar da farklıdır. Doğrudan pompalama sisteminde basınç 200 MPa'a kadar çıkabilirken, kısa devre sistemi 350 MPa basınç değerine ulaşabilir.

2.2.4. Su Demeti Sönümleyicileri

Su demetinin püskürtme memesi çıkışından sonraki gücünün yaklaşık %75'i kesilecek malzemeyi terk ettikten sonra da demet içerisinde kaldığından (Kalpakçıyan, 1995), önlem alınmadığı takdirde malzeme altındaki tezgah vb. delinip zarar görebilir. Ayrıca su demetinin malzeme dışına çıktığı durumlarda sahip olduğu tüm güç tezgaha iletilecektir. Aşındırıcı su demetinin işlem gören parçayı kestikten sonra tezgaha doğrudan etki etmeden önce belli bir sistemle yakalanıp enerjisinin soğurulması için kullanılan sistemlere sönümleyiciler adı verilir. Bu sistemler, su demetinin makine parçalarına zarar vermesini önlemenin yanında gürültü, toz vb. zararlı çevresel etkilerini de azaltırlar. Sönümleyiciler, demetin enerjisini kontrol edebilmek için sağlam, emniyetli ve uzun ömürlü olmalıdır.

Çalışılan malzemenin geometrisi, makine yapısı, çevresel gereksinimler ve kullanılan su demetinin türüne göre sönümleyici sistemin yapısı değişmektedir. Kullanılan sönümleyici sistemleri; taşınabilir sönümleyiciler, tank tipi sönümleyiciler ve kanal tipi sönümleyiciler olmak üzere üçe ayrılmaktadır (Şekil 2.27.).



Şekil 2.27. Değişik yapıdaki su demeti sönmleyicileri (a:taşınabilir sönmleyici, b:tank tipi sönmleyici, c:kanal tipi sönmleyici) (Külekçi, 2002)

Taşınabilir sönmleyiciler, tüp veya benzeri bir kap ve içindeki çelik bilye vb. enerji soğuran malzemelerden oluşur. Bu malzemeler kullanıldıkça aşınır ve belli aralıklarla kabın içerisindeki malzeme yenilenir. Taşınabilir sönmleyiciler, altı ekseninde çalışan robotlara monte edilebilen oldukça sağlam yapılı sistemlerdir.

Tank tipi sönmleyiciler, kesilecek malzemenin bir tezgah üzerinde sabit durduğu ve püskürtme memesinin sadece iki ekseninde hareket ettiği şartlarda kullanılmaktadır. Tank tipi sönmleyiciler kesim alanını oluşturan tezgahın altında yer alırlar ve tabanını tamamen kaplarlar ve enerjiyi soğurmak için içleri su ile doludur. Malzemenin üzerine koyulduğu tezgah ise düşey yönde yan yana dizilmiş plakalardan oluşur. Böylece su demetinin etkisi altındaki tankta bulunan suya iletilir. Tankın derinliği 60cm'den az olmamalıdır. Bu derinliğin daha az olması demetin enerjisinin tam olarak soğurulamamasına yol açacağından tank tabanında aşınma ve delinmelere yol açabilir. Uygulamalarda 40 cm derinlikte su demetinin tank tabanında delinmelere yol açtığı tespit edilmiştir.

Kanal tipi sönmleyiciler, kesilecek malzeme ile püskürtme memesinin ters doğrultuda hareket ettiği durumlarda kullanılırlar. Su demeti bu sistemde özel olarak yerleştirilmiş kanatlara çarptırılarak enerjisi tüketilir. Diğer sönmleyicilere oranla ağırlığı azdır ve hareket ettirmeye daha uygundur.

2.2.5. Kontrol Birimi

Su demeti ile kesme uygulamaları ilk başlarda kazı-koparma-ayırma gibi işlemlerde kullanılmaktayken, sistemin bilgisayar kontrolüne girmesiyle ve kontrol

yazılımlarındaki gelişmelerle birlikte hassas kesim yapan bir uygulama haline gelmiştir.

Su demetli kesme uygulamalarında kullanılan sistemler 2 veya 3 boyutlu kesme sistemleridir. Bu çalışma kapsamında da kullanılan sistem plaka türü (2 boyutu kalınlığına göre fazla olan) malzemelerin kesilmesinde kullanılan 2 boyutlu kesme sistemidir. Burada bilgisayar kontrollü iki eksen yani x-y tablası ve malzeme kalınlığını işlemek için elle veya yine bilgisayarla kontrol edilen bir z ekseni mevcuttur. 3 boyutlu sistemler ise daha karmaşık olup 5 veya 6 hareket sistemine ihtiyaç duyarlar. Böyle bir kontrol sistemi 0.1-400 mm/sn aralığında yanal hızları 3 boyutlu uzayda en az 5 koordinat ekseninde üretebilmektedir.

Su demetli kesme sisteminde, herhangi bir bilgisayar destekli tasarım programıyla üretilen tasarım verileri, yine bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak değerlendirilmekte ve doğrudan sayısal denetim cihazına ve sonra da hücre denetçisine girilmektedir.

Üretici firmaların sunduğu bilgisayar yazılımları, kesme hızı ve maliyetini 20'ye yakın parametrenin fonksiyonu olarak verebilmektedir. Böylece, belirli bir malzeme ve kalınlık için çeşitli parametrelerin kesme işlemini nasıl etkilediği görülebilmektedir.

3. AŞINDIRICILI SU DEMETİNİN YAPISI VE HİDRODİNAMİĞİ

Su demeti terimi çok yüksek hızlardaki su hüzmesini ifade etmektedir. Püskürtme memesinden çıkmadan hemen önce tüp içerisindeki hızı saniyede birkaç metre olan yüksek basınca (400 MPa civarında) sahip suyun su püskürtme memesi adı verilen dar bir aralıktan ivmelenecek çıkma zorlanması neticesinde yüksek hızlı su demeti oluşur. Su demeti, su püskürtme memesinden geçerken sahip olduğu yüksek basınç, çıkışta atmosfer basıncına düşmektedir. Bu sırada suyun hidrostatik enerjisi de enerjinin korunumundan hareketle kinetik enerjiye dönüşmektedir. Bu durumda Bernoulli eşitliği Eşitlik 3.1'deki gibi yazılabilir:

$$P_{atm} + \frac{\rho_{su}}{2} \cdot v_0^2 + \rho_{su} \cdot g \cdot h_1 = P + \frac{\rho_{su}}{2} \cdot v_{boru}^2 + \rho_{su} \cdot g \cdot h_2 \quad (3.1)$$

Burada;

P_{atm} : Atmosfer basıncı,

ρ_{su} : Suyun yoğunluğu,

v_0 : Suyun çıkıştaki hızı,

g : Yerçekimi ivmesi,

h_1 : Suyun püskürtme memesine gelmeden önceki referans düzlemine göre yüksekliği,

P : Suyun boru içindeki basıncı,

v_{boru} : Suyun boru içindeki hızı,

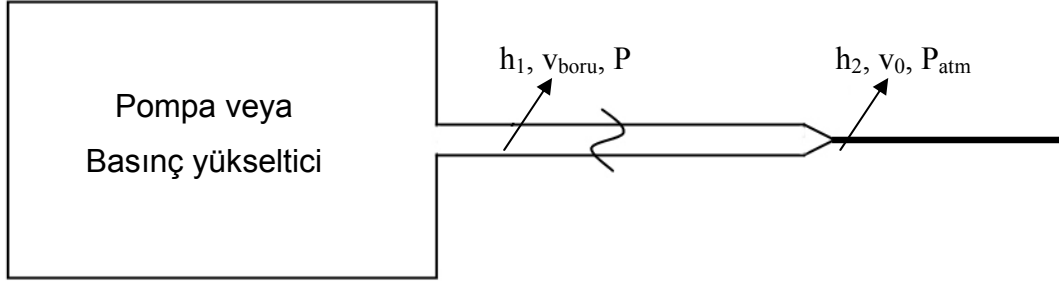
h_2 : Suyun püskürtme memesini terk ettiği andaki yüksekliğidir.

Su demetinin, püskürtme memesinden çıktığı nokta dikkate alındığında (Şekil 3.1);

$h_1=h_2$, $P_{atm} \ll P$ ve $v_0 \gg v_{boru}$ olduğundan püskürtme memesi çıkışında suyun hızı;

$$v_0 \text{ (teorik)} = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{su}}} \quad (3.2)$$

eşitliğiyle hesaplanabilir.



Şekil 3.1. Su demeti oluşumunun şematik gösterimi

Gerçekte sürtünmelerden, suyun sıkışabilirliğinden ve türbülansından dolayı oluşan kayıplar su demeti hızının bu değerden daha düşük olmasına neden olur. Gerçekte oluşan demetin hızı Eşitlik 3.3'deki gibi hesaplanabilir;

$$V_{o(\text{gerçek})} = \mu \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{su}}}} \quad (3.3)$$

Burada; (μ) çeşitli kayıpları karakterize eden verim katsayısıdır. Bu katsayı eşitliklerden görüleceği gibi su demetinin teorik hızının gerçek hızına oranıdır. Su demetinin gerçek hızını ölçmek için araştırmacılar çeşitli yöntemler kullanmışlardır. Aşındırıcılı su demetinde, aşındırıcı taneler içinde buldukları su ile aynı hıza sahip olduklarından araştırmacılar bu tanelerin hızını ölçme yoluna gitmişlerdir.

Swanson et al. (1987) manyetik aşındırıcı taneler kullanarak aşındırıcılı su demeti çıkışına iki iletken tel halka koyup tanelerin bunların arasından geçerken tel üzerinde oluşturdukları elektriksel sinyalleri izlemişler ve iki halka arasını ne kadar sürede geçtiklerini tespit ederek tanelerin ve dolayısıyla demetin hızını belirlemişlerdir.

Bazı araştırmacılar (Chen and Geskin, 1991; Neusen et al, 1992, 1994) ise lazer ışınını kullanarak tanelerin ve demetin hızını tespit etmeye çalışmışlardır.

Momber and Kovacevic (1995) ise aşındırıcılı su demetinin bir dinamometre üzerine çarpmasını sağlayarak darbe kuvvetini ölçmüşler ve momentum korunumundan hareketle Eşitlik 3.4'te verilen hız eşitliğini geliştirmişlerdir.

$$V_{\text{demet}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{demet}}}{\pi \cdot \rho_{\text{demet}} \cdot d_{\text{demet}}^2}} \quad (3.4)$$

Eşitlikte;

F_{demet} : Su demetinin darbe kuvveti (N),

ρ_{demet} : Su demeti yoğunluğu (kg/m^3),

d_{demet} : Su demeti çapıdır (mm).

Yukarıdaki eşitlikte, (v_{demet}) demetin gerçek hızı olarak kabul edilirse su demeti oluşumdaki kayıpları ifade eden (μ) katsayısı da Eşitlik 3.5 yardımıyla hesaplanabilir:

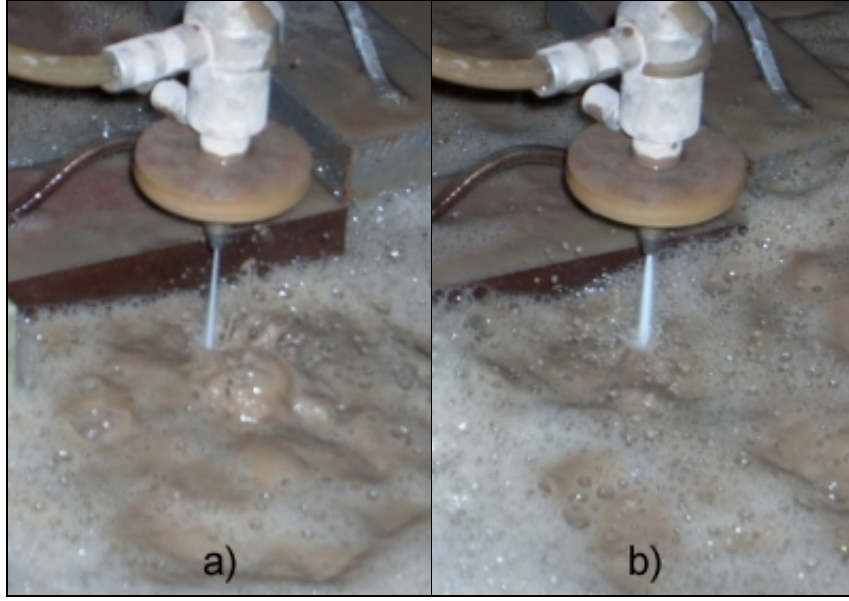
$$\mu = \frac{v_{o(\text{gerçek})}}{v_{o(\text{teorik})}} = \frac{v_{\text{demet}}}{v_{o(\text{teorik})}} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{\text{demet}}}{\pi \cdot \rho \cdot d_{\text{demet}}^2}} \quad (3.5)$$

3.1. Aşındırıcılı Su Demetinin Yapısı

Püskürtme memesinden çıkan su demetinin aşındırıcı su demeti püskürtme memelerinde bulunan karışım odasında aşındırıcı tanelerle karıştırılıp bir odaklama tüpünden geçirilmesiyle aşındırıcılı su demetleri oluşturulmaktadır. Aşındırıcılı su demeti püskürtme memelerinde ayrıca bir karışım odası ve odaklama tüpü bulunduğundan oluşan aşındırıcılı su demetlerinin yapısını etkileyen daha fazla parametre mevcuttur.

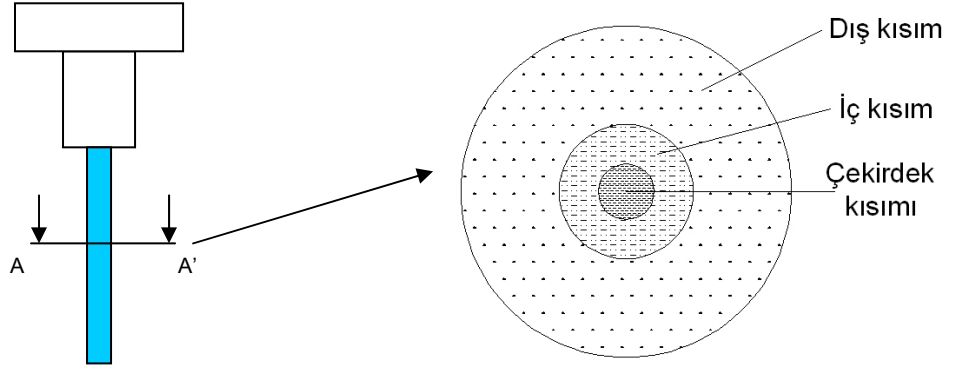
Püskürtme memesinden çıkan demetin yapısı, pompa basıncı, püskürtme memesi çapı ve kalitesi, aşındırıcı tane özellikleri, aşındırıcı besleme miktarı vb. birçok parametreden etkilenmektedir. Bu tip püskürtme memelerinde karışım odasının yapısı nedeniyle bir vakum oluşmakta ve böylece sisteme aşındırıcı eklenmesi sağlanmaktadır. Bu vakumla su demetine aşındırıcı taneler eklenirken aynı zamanda hava da demetin bünyesine girmektedir. Yapılan araştırmalarda oluşan aşındırıcılı su demetinin içerisinde hacimsel olarak %1 aşındırıcı, %4 su ve %95 hava olduğu tespit edilmiştir (Tazibt et al., 1996).

Aşındırıcılı su demeti püskürtme memesini terk ettikten sonra saf su demetine oranla hızlı bir şekilde çapı artarak ilerler (Şekil 3.2). Çok az aşındırıcı ilavesi olduğu durumda nispeten demetin çekirdek yapısı gözlenmekle birlikte, aşındırıcı beslemesi arttıkça demetin çapsal olarak merkezden sapması hızla artmaktadır. Ayrıca aşındırıcı tane çapı arttıkça demetteki bu sapma miktarı da artmaktadır.



Şekil 3.2. (a) Su demeti ve (b) aşındırıcı su demetinin püskürtme memesinden çıktıktan sonraki yayılımı

Simpson (1990) yaptığı çalışmada aşındırıcı su demetinin yapısını incelemiş ve demetin üç ana kısımdan oluştuğunu belirlemiştir. Kesiti düşünüldüğünde aşındırıcı su demeti, en içeride, su püskürtme memesi çapı kadar olan çekirdek kısmı, bunun dışında odaklama tüpü iç çapı ile su püskürtme memesi çapı arasında kalan iç kısım ve odaklama tüpü iç çapı ile demetin en dışına çıkan aşındırıcı tanelerin oluşturduğu dış kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Aşındırıcı su demetinin doğrultu eksenine dik şematik A-A'kesiti

Simpson (1990) tarafından yapılan çalışmada tane boyu arttıkça aşındırıcı tanelerin demetin iç bölgesine girmekte zorlandığı ve çoğunlukla dış bölgeye doğru kaçtığı gözlenmiştir. Ayrıca, püskürtme memesi çıkışından itibaren demet içerisindeki aşındırıcı tanelerin özellikle 12 mm'den sonra demetin dışına doğru hızla çıktıkları gözlenmiştir.

Aşındırıcılı su demetiyle kesme hataları genellikle demetin püskürtme memesinden çıktıktan sonra dağılarak ilerlemesinden kaynaklanmaktadır. Bu hataları önlemek için uygulanan yöntemlerden biri, kullanılan suya ticari adıyla “süper su” (super water) adı verilen katkı maddeleri eklemektir. Bu maddeler polietilen türü polimerlerden olup suyun hidrojen molekülleri arasındaki hidrojen bağına güçlendirerek oluşan aşındırıcılı su demeti hüzmelerinin dağılmadan uzun mesafe almasını sağlamaktadırlar (www.berkeleychemical.com; Geren ve Tunç, 2001).

Aşındırıcılı su demeti sistemine çok az miktarlarda eklenen bu maddelerle daha viskoz ve yağlayıcı özelliğe sahip su oluşturulduğu için, kesme verimi artırıldığı gibi sistemde oluşan aşınmalar da minimuma indirilmiş olmaktadır. Yapılan araştırmalarda sisteme süper su eklenmesiyle, pompa gücü gereksiniminin %31, aşındırıcı ihtiyacının %25-30 ve genel bakım giderlerinin %38 azaldığı ayrıca daha dar kesme aralığı olduğu, kesim işleminin daha hızlı ve kesim yüzeylerinin daha kaliteli olduğu görülmüştür.

Su demetinin kesme performansını artırmanın ve daha düzgün kenar ve köşeler oluşturmanın diğer bir yolu da püskürtme memesini açılı – salımlı kullanma, tek sefer yerine iki veya daha fazla seferde kesimin bitirilmesi gibi yöntemlerin kullanılmasıdır (Chen et al., 2002; Wang and Guo, 2003).

3.2. Aşındırıcı Malzemelerin Kinetik Enerjisi

Küresel bir aşındırıcı tanenin kinetik enerjisi (E_p) Eşitlik 3.6 ile ifade edilmektedir (Momber and Kovacevic, 1998).

$$E_p = \frac{\pi}{12} \cdot d_p^3 \cdot \rho_A \cdot v_p^2 \quad (3.6)$$

Burada;

d_p : Aşındırıcı tane çapı (mm),

ρ_A : Karışım yoğunluğu (kg/m^3),

v_p : Aşındırıcı tane hızıdır (m/s).

Aşındırıcılı su demetinde su demetinin sahip olduğu kinetik enerjinin tümü aşındırıcı taneye aktarılamaz. Enerjinin bir kısmı tanenin ivmelenmesinde harcanır. Sabit bir akış debisinde, püskürtme memesi ilerleme hızında, püskürtme

memesi mesafesinde ve belirli bir aşındırıcı malzeme için karışımdan sonra aşındırıcının sahip olduğu kinetik enerji Eşitlik 3.7 ile verilmektedir.

$$E_P = \alpha_T \cdot \frac{E_W}{N_p} \quad (3.7)$$

Burada;

E_W : Su demetinin kinetik enerjisi (Joule),

N_p : Aşındırıcı tane sayısı,

α_T : Enerji transfer katsayısıdır (0.075-0.09 arasında değer alır).

Aşındırıcı akış debisi arttıkça enerji transfer katsayısı da artmaktadır. Bir aşındırıcı tanenin kinetik enerjisi aşındırıcı akış debisinin artmasıyla ve aşındırıcı tane çapının azalmasıyla birlikte azalmaktadır.

3.3. Aşındırıcılı Su Demetinde Aşındırıcı Tanenin İvmelendirilmesi

Aşındırıcılı su demetiyle kesim işleminde kesim işlemini yapan asıl unsur aşındırıcı tanelerdir. Bu tanelerin kesme işlemini yapabilmeleri için yeterli hıza sahip olmaları gerekmektedir. Taneler yüksek hıza sahip su demetiyle değişik yöntemlerle karıştırılıp hızlandırılmaktadırlar. Kısa zamanda belirli hızlara ulaşmada ivmelendirme süreci önem kazanmaktadır.

3.3.1. Enjeksiyon Tipli Aşındırıcılı Su Demetinde Aşındırıcı Tanenin İvmelendirilmesi

Enjeksiyon tipi aşındırıcılı su demetlerinde tanelerin ivmelendirilmesi yüksek hızlı su demetinden düşük hızlı aşındırıcı tanelere momentum transferiyle olmaktadır.

Karışım odasındaki (Şekil 3.4) momentum dengesi Eşitlik 3.8'deki gibi yazılabilir.

$$m_a \cdot v_{po} + m_w \cdot v_o + m_L \cdot v_L = (m_a + m_w + m_L) \cdot v_p \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

m_a : Aşındırıcı debisi (g/s),

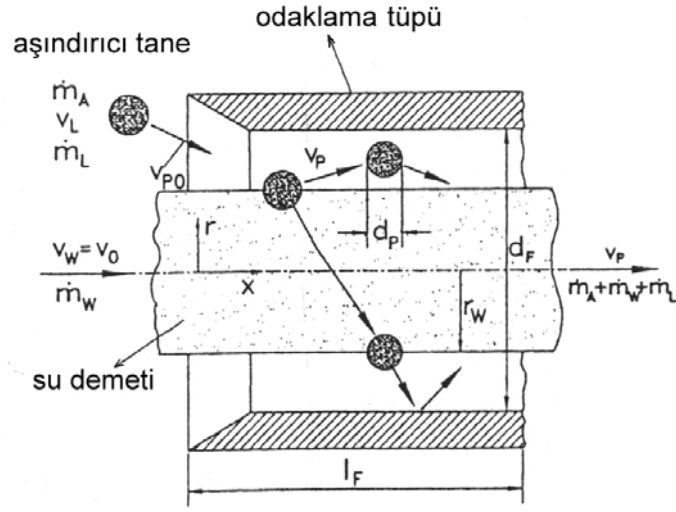
v_{po} : Aşındırıcı malzeme akış hızı (m/s),

m_w : Su demeti debisi (g/s),

v_o : Su demeti hızı (m/s),

m_L : Hava debisi (g/s),

- v_L : Hava hızı (m/s),
 v_p : Aşındırıcı tane hızıdır (m/s).



Şekil 3.4. Aşındırıcı tanelerin ivmelendirilmesinde momentum dengesi (Momber and Kovacevic, 1998).

Aşındırıcılı su demetinde hava miktarı demetin kütlece %3'ünü oluşturduğundan ihmal edilebilir. Ayrıca aşındırıcı akış hızı püskürtme memesi çıkışındaki hızına göre çok düşük olduğundan ihmal edilebilir. Aşındırıcıların ivmelendirilmesi sırasındaki kayıplar momentum transfer katsayısıyla (η) ifade edilmektedir. Aşındırıcı tanelerin son hızları Eşitlik 3.9 ile ifade edilmektedir.

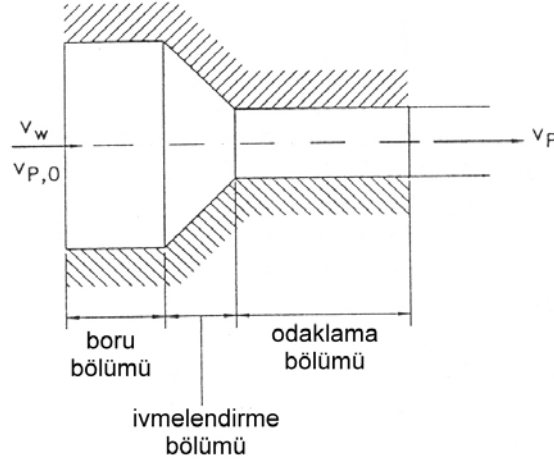
$$v_p = \eta \cdot \frac{v_o}{1 + \frac{m_a}{m_w}} \quad (3.9)$$

Burada;

- v_p : Aşındırıcı tane hızı (m/s),
 m_a : Aşındırıcı debisi (g/s),
 m_w : Su demeti debisi (g/s),
 v_o : Su demeti hızıdır (m/s).

3.3.2. Karışıklı Aşındırıcılı Su Demetinde Aşındırıcı Tane İvmelendirilmesi

Karışıklı aşındırıcılı su demeti püskürtme memesi Şekil 3.5'de görüldüğü gibi, boru kısmı, konik olarak tasarımılandırılan ivmelendirme kısmı ve odaklama kısmından oluşmaktadır.



Şekil 3.5. Karışımli aşındırıcılı su demeti püskürtme memesinin yapısı (Momber and Kovacevic, 1998).

Böyle bir sistemde oluşan aşındırıcılı su demeti içindeki aşındırıcı tanelerin hızı Bernoulli eşitliği yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilir (Eşitlik 3.10).

$$v_p = \mu_{süs.p.} \sqrt{\frac{2P}{\rho_{karışım}}} \quad (3.10)$$

Eşitlikte, ($\mu_{süs.p.}$) momentum transfer katsayısı olup , Shimizu (1996) yaptığı çalışmalarda bu değeri 12 MPa'lık pompa basıncı için 0,90-0,95 arasında belirlemiştir.

3.4. Su Demeti - Aşındırıcı Tane Etkileşim Özellikleri

Özellikle enjeksiyon tipi aşındırıcılı su demetlerinde, aşındırıcı malzemenin sisteme girmesi ve aşındırıcılı su demeti oluşturması sırasında aşındırıcı tanelerde boyut küçülmesi ve şekil bozulması gibi bazı değişimler meydana gelmektedir. Taneler püskürtme memesi içerisine girdiklerinde sahip oldukları hızları ve açılara bağlı olarak karışım odasında çarpma etkisiyle 'kırılma-ufalanma'ya maruz kalırlar. Buradaki boyut küçülmesinin şiddeti, karışım odasının geometrisine, pompa basıncına bağlı olarak aşındırıcı tanelerin sahip oldukları çarpma hızıyla yakın ilişkilidir. Bu hız arttıkça oluşan kırıntılıların şeklinin de değiştiği ve keskin köşeli tanelerden kübik-yuvarlak tanelere geçiş gösterdiği tespit edilmiştir (Galecki et al., 1987). Araştırmacılar, püskürtme memesine giren aşındırıcı tanelerin %70-80'inin kırılma-ufalanma gösterdiğini, bu sayının da

aşındırıcı tane boyu, pompa basıncı ve odaklama tüpü çapıyla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Aşındırıcı tanenin parçalanıp ufalanması aşağıda verilen eşitlikle şöyle ifade edilebilir (Eşitlik 3.11):

$$\Phi = 1 - \frac{\bar{d}_\phi}{\bar{d}_g} \quad (3.11)$$

Burada;

Φ : Boyut küçülme sayısı,

\bar{d}_g : Püskürtme memesi girişindeki ortalama tane boyu (mm),

\bar{d}_ϕ : Püskürtme memesi çıkışındaki tane boyudur (mm).

Granat için Φ sayısının 0.15 ile 0.70 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Galecki et al., 1987). Φ sayısının 0 olması herhangi bir kırılma veya ufalanmanın olmadığını göstermektedir. Aşındırıcı malzeme çeşitleri düşünüldüğünde tanelerin çatlakları, zayıf bölgeleri, kapanımları, vb. safsızlık ve kusurları da ufalanmayı artırıcı etki yapmaktadır. Martinec (1994) aşındırıcı tane şekillerindeki değişimi incelemiş ve tanelerin sahip olduğu şekil faktörünün memeden çıktıktan sonra düşüş gösterdiğini tespit etmiştir. Taneler küresellikten veya yuvarlaklıktan uzaklaşmaktadırlar.

4. AŞINDIRICILI SU DEMETİYLE KESME TEORİLERİ

Su demetiyle kesme işleminde su, hem güç dönüştürücü hem de kesici uç görevini üstlenmektedir. Su hüzmesi, kesilecek malzemeye ulaştığında, sahip olduğu kinetik enerjinin malzeme yüzeyinde oluşturduğu yüksek basıncın etkisiyle malzemenin bileşenlerinin yapısı bozularak malzeme uzaklaştırılması sağlanmış olmaktadır.

Su demetleri oluşturulurken içerisine vakum etkisiyle hava kabarcıkları eklenmesi sonucu kavitasyon etkili demetler elde edilir. Demet içerisinde çevredeki gaz basıncının altında basınç bölgeleri oluşturulduğunda bu vakumu saran küçük hava kabarcıkları oluşur. Kabarcıkların negatif iç basınçları nedeniyle demet malzeme yüzeyine ulaştığında yüksek çarpma basınçları oluşturmaktadır. Kabarcıkların parçalanmasıyla demetin kesme performansı önemli ölçüde artmaktadır. Bu tip su demetleri daha düşük pompa basınçlarında yüksek kesme-temizleme verimi sağlamaktadır.

Su demetinin etkisinin artırılması amacıyla uygulanan bir diğer yöntem ise akış miktarının değiştirilmesi kesikli hale getirilmesi ile darbe etkili demetlerin oluşturulmasıdır (Şekil 4.1). Bu uygulamalarda malzeme yüzeyinde oluşan basınç, sürekli su demetinin sağladığı basınçtan daha büyüktür. Demeti oluşturan damlacık malzeme yüzeyine çarptığında yanlara doğru yayılmaya fırsat bulamadan arkadan gelen damlacık tarafından tekrar yüzeye bastırılacaktır. Böylece yüzeyde basınç birikmeleri oluşacaktır. Yüzeyde elde edilen basınç sürekli demetlere oranla 20 kat fazla olmaktadır.



Şekil 4.1. Kesikli su demetinin hızlı çekim fotoğraf görüntüsü (Nebeker, 1983)

Saf su demetiyle kesme işleminin yeterli olmadığı durumlarda aşındırıcı ilavesiyle elde edilen aşındırıcılı su demetleriyle kesim işlemi gerçekleştirilmektedir.

Aşındırıcılı su demetlerinde, saf su demetlerindeki basınç etkisiyle aşındırıcı tanelerin aşındırma etkisi birleştirilmiş olmaktadır.

Saf su demetinde kesme aracı olarak su kullanılırken, aşındırıcılı su demetinde temel olarak demet içindeki aşındırıcı taneleri ivmelendirilmekte kullanılmaktadır. Aşındırıcılı su demetiyle kesme sırasında gelişen olayları açıklamak için birçok araştırmacı farklı yaklaşımlar ve modeller geliştirmişlerdir.

Aşındırıcılı su demet ile kesme mekanizmasını açıklamak için öncelikle tek bir aşındırıcı tanenin yaptığı aşındırmayı incelemek uygun olacaktır.

4.1. Tek Bir Aşındırıcı Tanenin Sebep Olduğu Aşınma

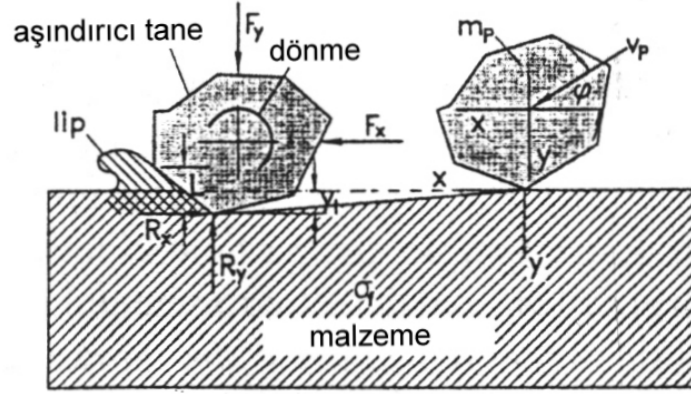
Tek bir aşındırıcı tanenin darbesi, malzeme uzaklaştırılmasında en temel olay olarak kabul edilmektedir. Bu olayı açıklamak için birçok araştırmacı farklı yaklaşımlar geliştirmişlerdir. Meng and Ludema (1995)'e göre temelde bir tanenin demet içinde ilerlerken malzeme yüzeyinden talaş kaldırmasında 4 temel mekanizma söz konusudur. Bunlar; kesme, yorulma, gevrek kırılma ve ergimedir. Bu mekanizmalar genellikle birlikte etkili olmaktadır. Hangi mekanizmanın etkili olacağı, darbe açısı, tanenin kinetik enerjisi, tane şekli, malzeme özellikleri ve çevresel koşullar gibi etmenlere bağlıdır.

Aşındırıcı tanenin oluşturduğu aşınma malzeme türüne bağlı olduğundan sünek ve gevrek malzemeler için ayrı ayrı aşınma mekanizmalarını incelemek uygun olacaktır.

4.1.1. Sünek Malzemelerin Aşınması

Sünek malzemelerin aşınmasını açıklamada Finnie (1958), "mikro kesme modeli"ni, Bitter (1963) "genişletilmiş kesme-deformasyon modeli"ni, Hutchings (1979) "kazıma-yığıma deformasyon modeli"ni, yine Hutchings (1979) "yorulma-ısı etki modeli"ni, Ellermaa (1993) ise bunların kritiği niteliğindeki bir modeli geliştirmiştir.

Finnie (1958) tarafından geliştirilen mikro kesme modeli Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Keskin köşeli tanecik malzeme yüzeyine temas ettiğinde akma gerilmesini yenerek dudak şeklinde bir yonga kesmektedir. Arkadan gelen taneler de bu yongayı uzaklaştırarak talaş kaldırma işlemini tamamlayacaktır.



Şekil 4.2. Mikro kesme modeli (Finnie, 1958)

Bitter (1963)'in genişletilmiş kesme-deformasyon modelinde ise malzeme uzaklaştırılması iki şekilde gerçekleşmektedir. Düşük temas açılarında kesme aşınması, yüksek temas açılarında ise deformasyon aşınması oluşmaktadır. Bitter (1963)'e göre, sünek malzemede taneler metal yüzeylere çarptıkça oluşan gerilim konsantrasyonları sertleşmeye neden olacaktır. Buna devam edilmesi durumunda elastik sınır (malzeme dayanımı) aşılarak kopmalar başlayacaktır. Bu şekilde oluşan aşınma deformasyon aşınması olarak isimlendirilmektedir.

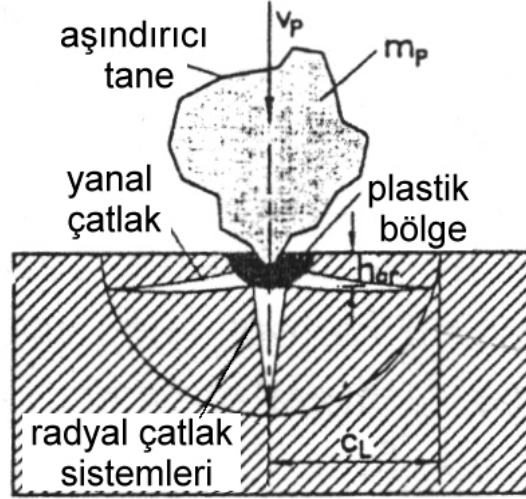
Hutchings (1979), yüksek hızlı fotoğraflar ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerine bakarak kesme deformasyonu ve kazıma-yığıma deformasyonu olmak üzere iki malzeme uzaklaştırma durumu tanımlamıştır. Araştırmacıya göre kazıma-yığıma deformasyonu küresel taneler tarafından oluşturulurken kesme deformasyonu keskin kenarlı açısız taneler tarafından sağlanmaktadır. Hutchings (1979) daha sonra sünek malzemelerin tek tane aşındırmasında ısıl etkileri değerlendirmiş ve yorulma esasına dayalı bir model geliştirmiştir. Modele göre darbe bölgesi çevresinde oluşan plastik deformasyon önemli ölçüde ısıyla ilişkili olmaktadır. Düşük darbe hızlarına sahip küçük taneler için ise bu modelin geçersiz olduğunu belirtmektedir.

4.1.2. Gevrek Malzemelerin Aşınması

Gevrek malzemelerin aşınması, sünek malzemelere oranla daha karmaşıktır. Yapılan çalışmalarda tane çarpması sonucu malzemede hem radyal hem de yanal kırıklar meydana geldiği, ayrıca çarpma noktası yakınlarında deformasyon sertleşmesi olduğu tespit edilmiştir. Sert seramiklerin kesilmesi sırasında küçük çarpma açılarının aktif olması durumunda, malzemede ısıl pullanma şeklinde

başka bir aşınma mekanizması oluşmaktadır. Bu tip malzeme yüzeyleri incelendiğinde granat tanelerinin sürtünme nedeniyle erime sıcaklığına ulaşmış malzeme yüzeyine sıvandığı gözlenmiştir (Akkurt, 2002).

Gevrek malzemelerin aşınmasını hesaplamak Şekil 4.3'de görülen çatlak oluşum geometrisi ile işlem parametreleri arasındaki ilişkilerin çözülmesine bağlıdır.



Şekil 4.3. Gevrek malzeme yüzeyinde oluşan kırılma (Buijs, 1994)

Bu ilişkileri açıklamak için araştırmacılar farklı modeller geliştirmişlerdir. Bu modeller için Mumber and Kovacevic (1998) tarafından verilen genel bir eşitlik Eşitlik 4.1'de görülmektedir.

$$V_m = C_1 \cdot (d_p/2)^{C_2} \cdot v_p^{C_3} \cdot H_M^{C_4} \cdot K_{Ic}^{C_5} \cdot E_M^{C_6}, \quad (4.1)$$

Burada;

- V_m : Aşınan malzeme hacmi,
- d_p : Aşındırıcı tane çapı,
- v_p : Tane hızı,
- H_M : İşlenen malzemenin sertliği,
- K_{Ic} : Malzeme darbe dayanımı,
- E_M : Malzeme elastisite modülüdür.

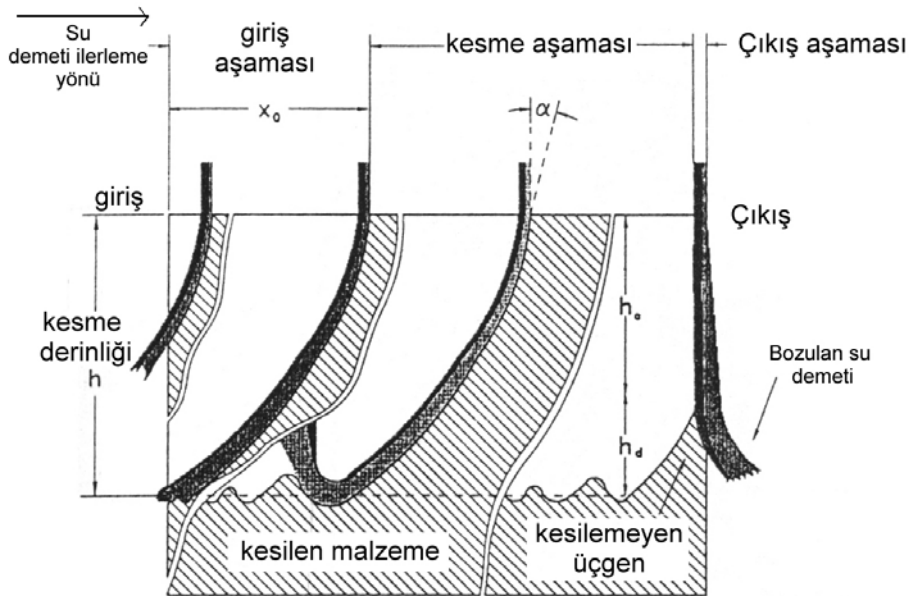
Gevrek malzemeler için farklı aşınma modellerinde kullanılan üs değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Gevrek malzemeler için aşınma modelleri

Temel Model	Kaynak	C2	C3	C4	C5	C6
Elastikiyet modeli	Sheldon and Finnie, 1966	f(M)	f(M)	-	-	-
Yarı-Statik Yanal Çatlak Modeli	Wiederhom and Lawn, 1979	3,67	2,45	0,11	-1,33	-
Dinamik Yanal Çatlak Modeli	Evans et al., 1976	3,67	3,17	-0,25	-1,33	-
Değiştirilmiş Yanal Çatlak Modeli	Marshall et al., 1982	3,50	2,33	-1,42	-1,00	1,25
Tanecik Koparma Modeli	Ritter, 1985	3,00	2,00	-	-2,00	1,00
Çentik Modeli	Buijs, 1994	-	-	-1,42	-1,00	1,25

4.2. Malzeme Uzaklaştırılmasının İki Boyutlu Modeli

Hashish (1984 ve 1988) aşındırıcılı su demetiyle kesme işlemini ilk olarak sistematik şekilde incelemiştir. Saydam malzemelerin kesimi sırasında çektiği yüksek hızlı fotoğraflara dayanarak kesme işleminin iki boyutlu yapısını Şekil 4.4'deki gibi ifade etmiştir.



Şekil 4.4. Aşındırıcılı su demetiyle kesme sürecinin iki boyutlu yapısı

Yanal ilerleme boyunca kesme hareketi; başlangıç aşaması, kesme aşaması ve çıkış aşaması olmak üzere üç safhada incelenmektedir. İlk aşamada kesme

derinliği maksimum kesme derinliğinden daha dūřüktür. Bu aşamada demet y yönünde ilerleyerek malzeme uzaklaştırma işlemine başlatmaktadır. Maksimum kesme derinliğine ulaşılmasıyla kesme aşaması başlar. Demet malzeme çıkışında yanal hareket yönüne ters yönde saparak tipik bir kesilmemiş üçgen oluşturmaktadır. Bu kısım da çıkış safhası olarak nitelendirilir.

Kesme aşamasında malzeme uzaklaştırılması iki farklı bölgede iki farklı yapıda çevrimsel olarak gelişmektedir. Bu bölgeler, kesme aşınması bölgesi ve deformasyon aşınması bölgesi olarak isimlendirilmektedir. h_c ile gösterilen kısım kesme aşınması bölgesi olarak kabul edilmektedir. Burada taneler düşük temas açılılarıyla malzeme yüzeyinden mikro kesme suretiyle talaş kaldırmaktadır. Aşındırıcılı su demeti bu bölgede nispeten düşey konumda ilerlemektedir.

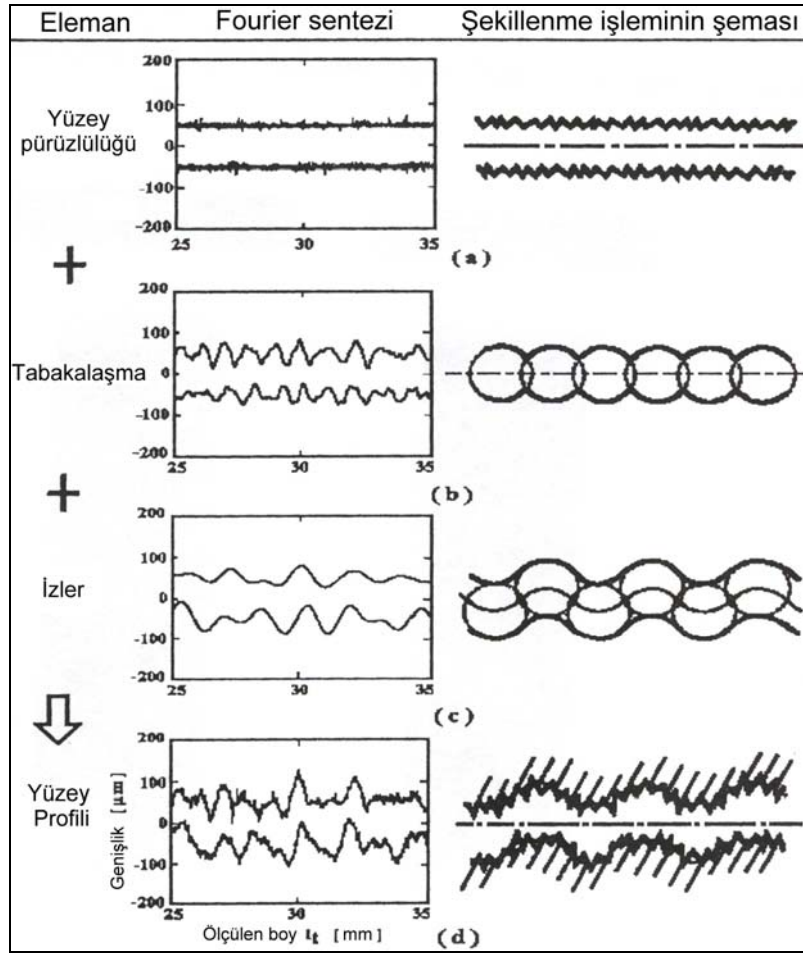
Belli bir temas açısına ulaşıldığında, talaş kaldırma işlemi deformasyon aşınmasına dönüşmektedir. Bu bölgede, artan kesme derinliğine bağlı olarak su demeti azalan oranda malzemeye nüfuz etmektedir. Taneler daha büyük açılarla malzeme yüzeyine çarpmaktadırlar. Dolayısıyla tanelerin darbe etkisiyle yüzey sertleşmesi ve sonrasında meydana gelen çatlak oluşumuyla aşınma oluşmaktadır. Dalgalı, izgili görünümüyle bu bölge kendini belli etmektedir. Mikroskobik incelemelerin yetersizliğinden dolayı geliştirilen bu modelde kesme aşınmasındaki mekanizmalar tam olarak açıklanamamaktadır.

4.3. Malzeme Uzaklaştırılmasının Üç Boyutlu Modeli

Aşındırıcılı su demetiyle kesme işlemi Guo (1994) tarafından üç boyutlu olarak modellenmiştir (şekil 4.5). Bu modele göre, yanal ilerleme yönünde kademe oluşumu söz konusuyken, ilerleme yönüne dik yönde de demetteki sapmaya (salınım) bağlı olarak bir kademe oluşumu söz konusudur (Momber and Kovacevic, 1998).

Burada dört temel mekanizma söz konusudur:

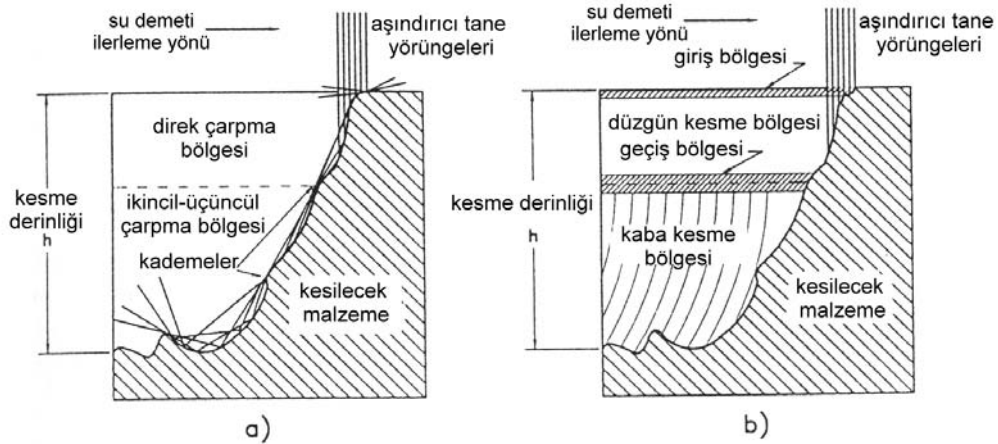
- | | | |
|--|---|--------------------------|
| ➤ Aşındırıcı tane darbesi | > | Pürüzlülük oluşumu |
| ➤ Kesme yönünde kademe oluşumu | > | izgisel izlerin oluşumu |
| ➤ Kesme doğrultusuna dik demet salınıımı | > | Kanal oluşumu |
| ➤ Klavuz sisteminin salınıımı | > | Diğer etkiler |



Şekil 4.5. Malzeme uzaklaştırılmasının üç boyutlu modeli (Guo, 1994)

4.4. Malzeme Uzaklaştırılmasında Alternatif Modeller

Zeng and Kim (1992), kesme derinliği arttıkça tane darbe açılarının değiştiğini belirterek Şekil 4.6.a' daki iki aşamalı modeli geliştirmiştir.



Şekil 4.6. Malzeme uzaklaştırılmasının kesme önü modelleri (Zeng and Kim, 1992; Arola and Ramulu, 1993)

İlk aşamada (direk çarpma bölgesi) aşındırıcı taneler doğrudan kesme noktasına çarpmaktadır. Demet malzeme boyunca ilerledikçe demetin arkasında kalan alanda (ikincil ve üçüncül çarpma bölgesi) doğrusallığından sapan taneler sebebiyle eğik bir kesme önü yapısı oluşmaktadır.

Arola and Ramulu (1993) ve Ramulu and Arola (1994) geliştirdikleri alternatif modelde kesme önünü üç bölgeye ayırmışlardır (Şekil 4.6.b). Giriş bölgesi veya tahrip olmuş bölge olarak adlandırılan ilk kısım, sünek malzemelerde tanelerin dik çarpması sonucu oluşmaktadır. Bu bölgenin kalınlığı püskürtme memesi-malzeme arası mesafeye bağlı olarak değişmektedir. Bu bölgenin altında düzgün kesme bölgesi ve kaba kesme bölgesi yer almaktadır. Bu isimlendirmeler kesme mekanizmalarından çok oluşan yüzey özelliklerine göre verilmiştir. Araştırmacılar demetin derinlikle beraber sapmasını, içerdiği aşındırıcı tanelerin kinetik enerjisindeki azalmayla açıklamaktadırlar.

4.5. Aşındırıcılı Su Demetiyle Kesmede Enerji Denkliği

Kesme sırasında malzeme tarafından yutulan enerji Eşitlik 4.2'de verilmektedir.

$$E_Y = E_A - E_Ç \quad (4.2)$$

Burada;

E_Y : Malzeme tarafından yutulan enerji,

E_A : Aşındırıcılı su demetinin kinetik enerjisidir.

$E_Ç$: Çıkıştaki demetin kinetik enerjisi,

Aşındırıcılı su demetinin kinetik enerjisi ise Eşitlik 4.3'de verilmiştir.

$$E_A = (m_A + m_W) \cdot v_p^2 \cdot \frac{d_f}{2 \cdot v} \quad (4.3)$$

Eşitlikte;

m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),

m_W : Su debisi (g/s),

v_p : Aşındırıcı tane hızı (m/s),

d_f : Odaklama tüpü çapı (mm),

v : Püskürtme memesi yanal hızıdır (mm/s).

Demetin malzemeyi kesebilmesi için kritik bir enerji seviyesi (E_S) vardır. Bu enerji seviyesi, kesme derinliğinin alt sınırında demetin malzeme içersine nüfuz edemediği noktada kendini göstermektedir. Bu noktada $E_C = E_S$ dir. Diğer eşitliklerle birlikte

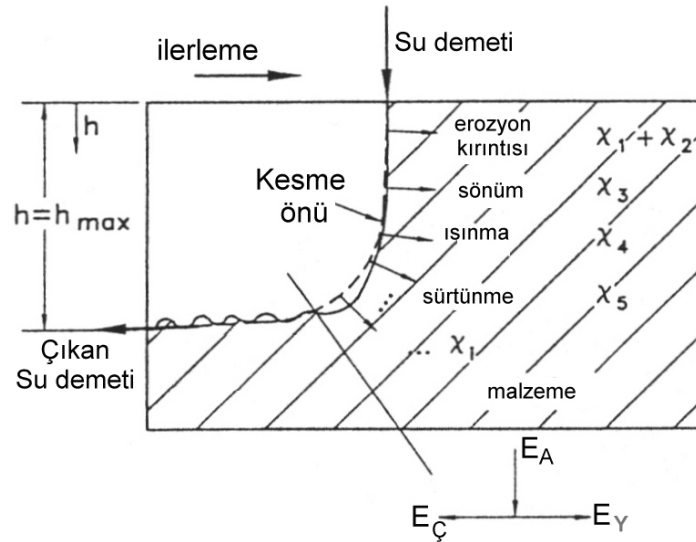
$$E_Y(h=h_{maks})=E_A-E_S \quad (4.4)$$

elde edilir.

Bu eşitlik genel olarak ise şu şekilde yazılabilir:

$$0 < h < h_{maks} \text{ için } E_Y(h) = X(h) \cdot [E_A - E_S], \text{ (} h = h_{maks} \text{ için } X = 1; h = 0 \text{ için } X = 0) \quad (4.5)$$

Buradaki X katsayısı enerji soğurulması sırasındaki farklı mekanizmalardan kaynaklanan kaybı izah etmektedir. Demetteki enerji kayıpları Şekil 4.7'de verildiği şekilde ortaya çıkar:



Şekil 4.7. Kesme önünde enerji durumu (Momber and Kovacevic, 1994)

- Kırıntı oluşumundaki enerji kaybı (X_1)
- Oluşan kırıntının ivmelendirilmesi için harcanan enerji (X_2)
- Kesme önündeki demet filminin tıkanması sonucu harcanan enerji (X_3)
- Malzemenin ısınmasında harcanan enerji (X_4)
- Kesme önündeki sürtünme sonucu harcanan enerji (X_5)
- Diğer enerji kaybı süreçleri (X_6)

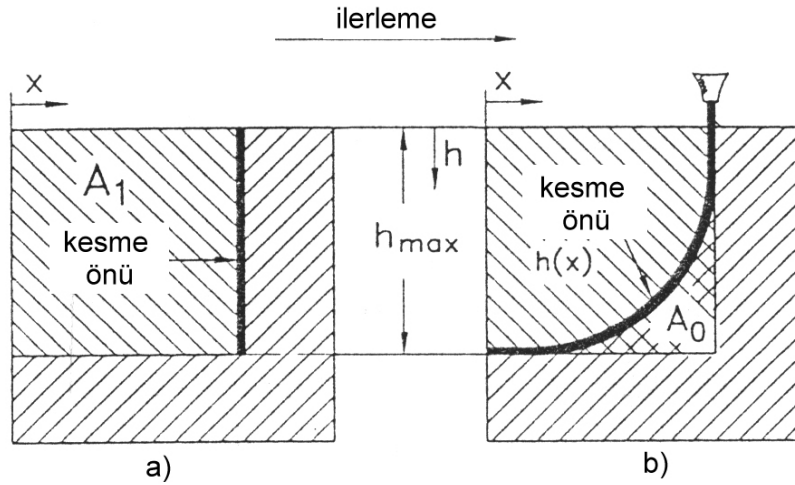
Oyuk açıldığında, malzeme demetin başlangıçtaki enerjisinin %60-90'ını kullanmaktadır. Kesme işlemi sırasında, malzemenin harcadığı enerjinin demetin ilk enerjisine oranı çok düşük değerlerde kalmaktadır. Düşük demet basınçlarında ve düşük oyuk derinliklerinde malzemenin soğurduğu enerji değeri artmaktadır.

Kesme derinliğine karşılık malzemenin soğurduğu enerji eğrileri incelendiğinde parabolik bir ilişki görülmektedir. Dolayısıyla eşitlik, aşağıda verilen duruma gelmektedir:

$$E_v(h_{maks}) = a_1 \cdot h_{maks}^2 + b_1 \cdot h_{maks} + c_1 \quad (4.6)$$

İdeal ve gerçekteki kesme durumunun şematik gösterimini veren Şekil 4.8 incelendiğinde A_0 ile gösterilen alanın enerji kaybını verdiği açıktır. Bu alan Eşitlik 4.7 kullanılarak hesaplanabilir.

$$A_0 = h_{maks} \cdot X - \int_0^x h(x) dx \quad (4.7)$$



Şekil 4.8. (a) İdeal ve (b) gerçekteki kesme durumunun şematik gösterimi (Momber and Kovacevic, 1994)

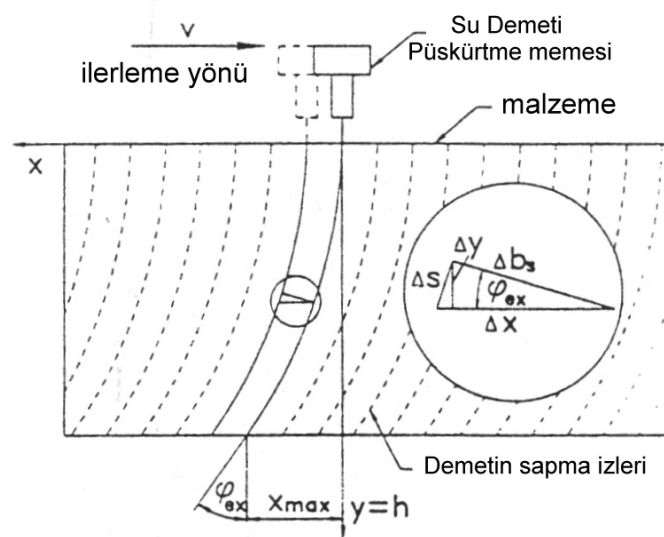
4.6. Aşındırıcılı Su Demetiyle Kesmenin Matematiksel Modellenmesi

Aşındırıcılı su demeti ile kesme sürecini açıklamak için araştırmacılar birçok model geliştirmişlerdir. Bu modellerin önemli bir kısmı belli etmenler altında maksimum kesme derinliğini açıklamaya yönelik modellerdir. Eşitliklerin elde edilmesindeki temel hareket noktaları dikkate alındığında modeller; hacim yer değiştirmesi modelleri, enerjinin korunumu modelleri, regresyon modelleri ve sayısal benzetişim modelleri olarak da sınıflandırılabilir (Momber and Kovacevic, 1998). Geliştirilen bu

eşitlikler klasik, yarı ampirik ve ampirik olarak da sınıflandırılabilir (Brandt et al., 2000).

Hashish (1987), aşındırıcı tanelerin malzeme yüzeyinden yaptıkları hacimsel aşınmayı dikkate alarak bir model geliştirmiştir. Hashish (1987) kesme sürecini iki kısma ayırmış (mikro kesme ve deformasyon aşınması) her biri için ayrı model ileri sürmüştür. Hashish tarafından geliştirilen model daha çok metalik veya sünek malzemeler için uygun sonuçlar vermektedir.

Zeng et al. (1991 ve 1992) kesme önü geometrisini makroskobik olarak inceleyerek aşındırıcı tanelerin aşındırmasını modellemişlerdir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Aşındırıcı su demetiyle kesimi sırasındaki demetin geometrik durumu (Zeng et al., 1991; Zeng et al. 1992)

Buna göre kesme derinliği Eşitlik 4.8'deki formülle ifade edilmektedir.

$$h = \frac{m_A \cdot m_W^2 \cdot p}{2.67 \cdot (m_A + m_W)^2 \cdot d_f \cdot v \cdot R_E} \quad (4.8)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
- p : Su (pompa) basıncı (MPa),
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- m_W : Su debisi (g/s),
- d_f : Odaklama tüpü çapı (mm),
- v : Püskürtme memesi yanal hızıdır (mm/s).

Burada, R_E aşınma direnci olarak tanımlanmaktadır. Bu sayı Zeng et al. (1992) tarafından geliştirilen malzemenin işlenebilirlik katsayısının tersidir ($R_E = 1/N_m$). Zeng and Kim (1993) daha sonra bu eşitliği daha sadeleştirerek yeni bir model geliştirmişlerdir (Eşitlik 4.9).

$$h = \frac{N_m \cdot p^{1.25} \cdot m_A^{0.343} \cdot m_W^{0.687}}{8,8 \cdot v^{0.866} \cdot d_f^{0.618}} \quad (4.9)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
- p : Su (pompa) basıncı (MPa),
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- m_W : Su debisi (g/s),
- N_m : Malzemenin işlenebilirlik katsayısı
- d_f : Odaklama tüpü çapı (mm),
- v : Püskürtme memesi yanal hızıdır (mm/s).

Modelin yapılan deneylerde gerçek değerden biraz yüksek sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Özellikle yumuşak malzemelerde %80'e varan sapmalar olabilmektedir. Bununla birlikte gevrek malzemelerde özellikle seramik türü malzemelerde iyi sonuçlar vermektedir.

lihoshi et al. (1986) aşındırıcılı su demetiyle kayaçların kesilmesinde bir model geliştirmişlerdir (Eşitlik 4.10).

$$h = \left[c_{01} + c_{02} \cdot \left(\frac{m_A}{m_W} \right)^{c_2} \right] \cdot \frac{P_W}{v \cdot x} \quad (4.10)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
- P_W : Su (pompa) basıncı (MPa),
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- m_W : Su debisi (g/s),
- x : Durma mesafesi (cm),
- v : Püskürtme memesi yanal hızıdır (cm/s).

Eşitlik 4.28'deki c_{01} ve c_{02} aşındırıcı tanenin özelliklerine bağlı çoklu regresyonla hesaplanan katsayılarıdır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. lihoshi et al. (1986) tarafından geliştirilen modele ait regresyon katsayıları

Aşındırıcı tipi	Parametreler		
	C ₀₁	C ₀₂	C ₂
Granat	0,44	5,55	0,762
Silika kumu		2,93	0,762
p=180-380 MPa, v=0,17-2,5 cm/s			

Yazıcı (1989) ise karışımli aşındırıcılı su demetiyle kayaçların kesilmesinde kesme derinliğini belirlemede bir regresyon modeli geliştirmiştir:

$$h = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot m_A^{c_2} \cdot d_f^{c_4} \quad (4.11)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
- p : Su (pompa) basıncı (MPa),
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- d_f : Odaklama tüpü çapıdır (mm).

Eşitlik 4.11'de geçen regresyon parametreleri veya işlem parametrelerini ifade eden katsayılar Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. Yazıcı (1989) tarafından geliştirilen modele ait parametre sınırları ve ilgili regresyon katsayıları

Makine ve Malzeme Etmenleri	Değer aralığı	Regresyon katsayısı ve değerleri	
Püskürtme memesi yanal hızı: v (cm/dk)	15,2	-	-
Su (pompa) basıncı :P (MPa)	20,7-34,0	C1	1,012
Aşındırıcı debisi: m _A * (g/s)	46,0-149,0	C2	0,318
Odaklama tüpü çapı: d _F (mm)	1,98-2,77	C4	0,308
		C0	3,799
*Aşındırıcı türü: Granat, d _p = 296 µm			

Matsui (1991), malzeme özellikleriyle kesme derinliği arasındaki ilişkileri inceleyerek bir model geliştirmiştir (Eşitlik 4.12 ve Eşitlik 4.13).

$$h = \frac{10^{4.74}}{(H \cdot \varepsilon)^{0.67} \cdot v} \quad (\text{sünek malzemeler için}) \quad (4.12)$$

$$h = \frac{10^{0.91}}{\left(\frac{\sigma_u^2}{2.E}\right)^{1.97} \cdot \nu} \quad (\text{gevrek malzemeler için}) \quad (4.13)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm)
- H : Malzeme sertliği
- ε : Birim deformasyon
- ν : Malzemenin Poisson oranı
- σ_u : Malzemenin tek eksenli basma dayanımı (MPa)
- E : Elastisite modülüdür (MPa).

Kovacevic (1992), faktöryel yaklaşımla kesme derinliğini matematiksel modellemiştir (Eşitlik 4.14). Eşitlikte geçen regresyon katsayıları çelik, titanyum ve alüminyum malzemeler için belirlenmiştir.

$$h = c_0 \cdot p^{c1} \cdot m_A^{c2} \cdot \nu^{c3} \cdot d_f^{c4} \cdot x^{c6} \quad (4.14)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm)
- p : Su (pompa) basıncı (MPa)
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- d_f : Odaklama tüpü çapı (mm),
- x : Durma mesafesi (mm),
- ν : Püskürtme memesi yanal hızıdır (mm/s).

Momber (1995), aşındırıcılı su demetiyle malzeme uzaklaştırılmasında kinetik bir model geliştirmiştir. Bu modelde malzeme uzaklaştırılması olasılık süreci olarak değerlendirilmiş ve tane geometrisi, hızı, ve darbe açısı gibi tane özellikleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

Momber and Kovacevic (1997), beton ve benzeri çatlak içeren gevrek malzemeler için enerjinin korunumundan hareketle bir model geliştirmişlerdir. Chung et al. (1992), sadece alüminyum, titanyum ve çelik türü malzemeler için geçerli olan ampirik bir eşitlik geliştirmişlerdir. Kovacevic et al. (1994) ve Babu et al. (1998), bulanık mantıkla kesme derinliğini belirlemede kullanılan eşitlik geliştirmişlerdir.

Brandt (2000) ise bütün bu modellerin pratikte kullanımının zorluğunu dile getirerek basit ve kullanışlı bir model ileri sürmüştür (Eşitlik 4.15):

$$h_{\max} = A \cdot \frac{p^B \cdot m_p^C}{v^D} \quad (4.15)$$

Eşitlik 4.15.'deki A, B, C, D katsayıları malzemenin türüne göre değişen malzeme sabitleridir. P, demetin basıncı, m_p , aşındırıcı debisi, v, püskürtme memesi yanıl hızıdır.

Günümüzde de aşındırıcılı su demeti ile kesme sürecini ifade edecek matematiksel eşitliklerin ve modellerin araştırılmasına devam edilmektedir. Yöntemin çoğunlukla metalik malzemelerde kullanılıyor olması çalışmaların da ağırlıklı olarak bu tür malzemelerin üzerinde yoğunlaşmasına neden olmaktadır.

5. SU DEMETİNİN KULLANIM ALANLARI

Su demeti sistemi çeşitli avantajlarından ötürü endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Bu alanlar uzay ve havacılık sanayii, otomotiv sanayii, gıda sanayii, kağıt ve mukavva sanayii, tekstil ve giyim sanayii, kauçuk ve plastik sanayii, ayakkabı ve deri sanayii, elektrik-elektronik sanayii, temizlik sektörü, metal işleme sektörü, madencilik sektörü, cam, seramik sektörüyle birlikte izolasyon uygulamaları olarak sıralanabilir (Geren ve Tunç, 2001).

5.1. Madencilikte Su Demeti Kullanımı

Madencilik sektöründe, delik delme, kayaç veya kömürün kazılması-kesilmesi, hidrolik veya hidromekanik kazı, tünel açma, doğal taş ocak işletmeciliğinde blok çıkarma ve hassas kesim çalışmalarında su demeti ve aşındırıcılı su demeti kullanılmaktadır.

Su demeti madencilikte ilk olarak yumuşak kayaçlarda kazı amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Daha sonra kömür kazısında doğrudan kazı işleminde ve mekanik kesicilere yardımcı olarak kullanılmıştır. Sert kayaçlarda delme-kazı çalışmalarının olumlu sonuçlar vermesiyle birlikte sert taş ocak işletmeciliğinde blokların ana kütlede ayrılmaması ve ebatlanmasında kanal açılması işlemlerinde kullanılmaya başlanmıştır.

1982 yılında su demetine aşındırıcı eklenmesi ile elde edilen aşındırıcılı su demeti son yıllarda mermer plakalarından dekoratif ürünler elde edilmesi amacıyla yapılan hassas kesim uygulamalarında kullanılmaktadır.

1970-1980 yılları arasında su demetinin endüstrinin diğer alanlarındaki kullanım avantajlarının görülmesiyle birlikte çalışmalar bu alanlara kaymış ve özellikle 1980'den sonra kayaç kesme araştırmalarında ciddi bir azalma gözlenmiştir. Günümüzde de su demeti yoğun olarak imalat sanayiinde kullanıldığından yapılan araştırmalar büyük oranda bu alanda gerçekleştirilmektedir.

5.1.1. Delik Delme İşlemlerinde Su Demeti Kullanımı

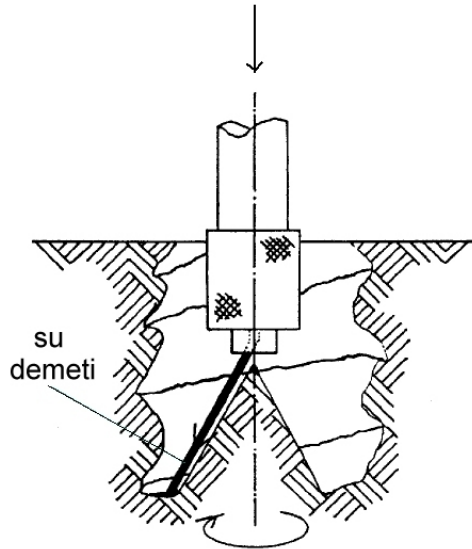
Arama, hazırlık ve üretim çalışmalarında açılan sondaj ve ateşleme deliklerinin hızlı ve ekonomik olarak açılması istenir. Özellikle, derin petrol sondajlarında

delme dizisinin ucundaki matkabın delikten geri çekilerek değiştirilmesi çok zaman almaktadır. Bunun için yeni delik delme metodları geliştirilmektedir.

Delik delme araştırması yapan bir grup araştırmacı, yaptıkları deneylerle, su demetlerinin matkaba uygun konumlarda yerleştirilmesiyle ilerleme hızının, bilinen yöntemlere göre 3 kat kadar artabileceğini gözlemişlerdir (Maurer et al., 1974).

Su demetleriyle ateşleme deliklerinin açılmasında iki teknik kullanılmaktadır. Birinci teknikte, yalnız su demetleri kullanılarak delik delinmektedir. Bu teknik, öncelikle Amerika ve Kanada'da geliştirilmiştir.

Summers and Bushnell (1976), 69 MPa basınca sahip bir su demetiyle kumtaşıda açtıkları 30 mm çaplı bir delikte 0,4 m/dk'lık bir hıza ulaşmışlardır. Summers et al. (1978), daha sonra 1m/dk'lık bir hıza ulaşmışlardır. Kanada'da Veenhuizen et al. (1978), 175 MPa basınca sahip bir su demetiyle kumtaşıda açtıkları 24 mm çaplı bir delikte 3,3 m/dk'lık bir ilerleme hızına ulaşmışlardır. Brook and Summers (1969), kesme deneyleriyle birlikte eğimli demet ve dönme hareketini kullanarak kayada delik delme çalışmaları yapmışlardır (Şekil 5.1). 15 saniyede 5 cm çapında 10 cm derinliğinde delik delmeyi başarmışlardır.



Şekil 5.1. Su demetiyle yapılan delik delme sistemi

Summers (1978), ayrıca 85 MPa'lık demetle, kayada 5 cm'lik deliği 2,2 m/dk'lık hızla delebilmştir. Bu da patlatma deliklerinin bu yöntemle açılabilirliğini göstermektedir.

İkinci teknikte ise darbeli delik delme makineleri ile su demetleri birlikte kullanılarak delik delinmektedir. Bu teknik daha çok Japon araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir (Nagano et al., 1974; Hoshino et al., 1976; Nagano et al., 1978). Burgunun ucuna yerleştirilen püskürtme memeleri yardımıyla delik dibine yüksek basınçlı su verilerek ön gevşeme sağlanmaktadır. Bu yöntemle bilinen delik delme yöntemlerine göre 2-5 kat daha fazla bir ilerleme hızına ulaşılabileceği kaydedilmiştir.

1986 yılında DIAJET sisteminin delicilere adapte edilmesi olumlu sonuçlar vermiştir. 35 MPa'lık pompalar daha küçük, ucuz ve kolay manevra edilebilir pompalardır. Düşük basınç esnek borularla suyun delici uca iletimini mümkün kılmaktadır. Taşıyıcı aksın yapısı da daha basit olmaktadır. Yöntemin avantajı, geleneksel yöntemlerle delinemeyen kayaçları düşük basınç ve az miktarda aşındırıcı kullanılarak delinebilmesine olanak sağlamasıdır. Geleneksel ekipmanlara göre daha düşük dönme hızlarında daha yüksek verimle çalışma sağlanmaktadır. Her bir geçişte demet daha derine nüfuz etmektedir. Bu durum ekipmanın püskürtme memesi kısmından kırıntıların uzaklaştırılmasına imkan verebilecek bir şekilde yapılmasını gerektirmektedir. Yoksa oluşacak kırıntı püskürtme memesi etrafındaki deliklerden geçemeyebilir. Ayrıca püskürtme memesi gövdesinin ilerleyebilmesine izin verecek bir açıklık oluşumunu da sağlamalıdır.

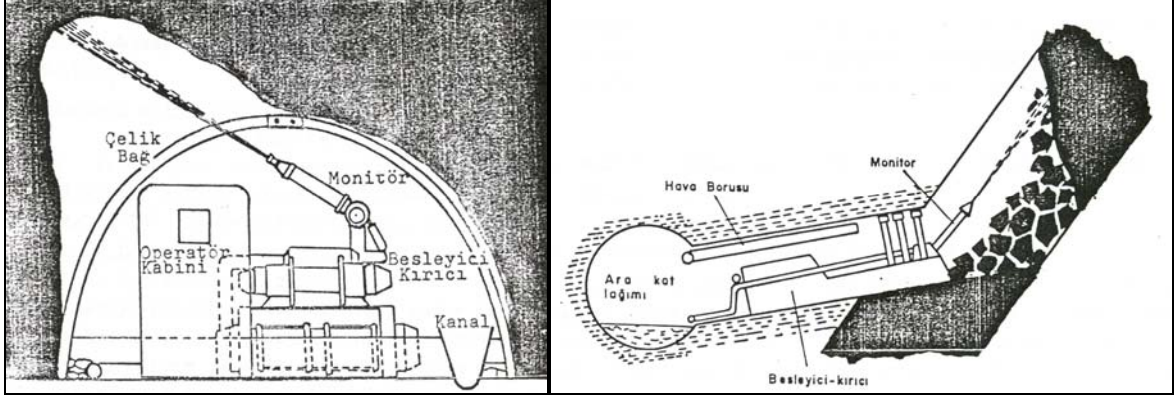
Bu durum, püskürtme memesi montaj çapının 2,5 cm olduğu durumda demet çapının 1,5 mm olduğu düşünüldüğünde önem kazanmaktadır. İşlem süresinde ön demetler ucun 3-5 cm önünde kayacı keserek ilerlemektedirler. Tercih edilen tasarımlarda, bir demet merkezde 5°'lik açıyla kesim yaparken, dışarda 30° eğimle kesim yapan genişletici demet püskürtme memesi gövdesinin geçebilmesi için deliğin genişletilmesini sağlar.

Delme işlemini etkileyen diğer parametreler de, aşındırıcı sertliği, tane boyu ve demet içerisindeki oranıdır.

5.1.2. Hidrolik ve Hidromekanik Madencilik

Hidrolik madencilik terim olarak cevherin arıandan su gücüyle kazılması ve su-cevher karışımının hidrolik olarak taşınmasına kadar olan tüm çalışmaları

kapsamaktadır. Kazılan cevherin arından uzaklaştırılması hidrolik madenciliğin ön koşullarından birincisidir. Bu şart ancak kömür kazısında gerçekleşebildiği için hidrolik madencilik, kömür işletmeciliği alanında yaygın olarak uygulanmaktadır (Şekil 5.2).

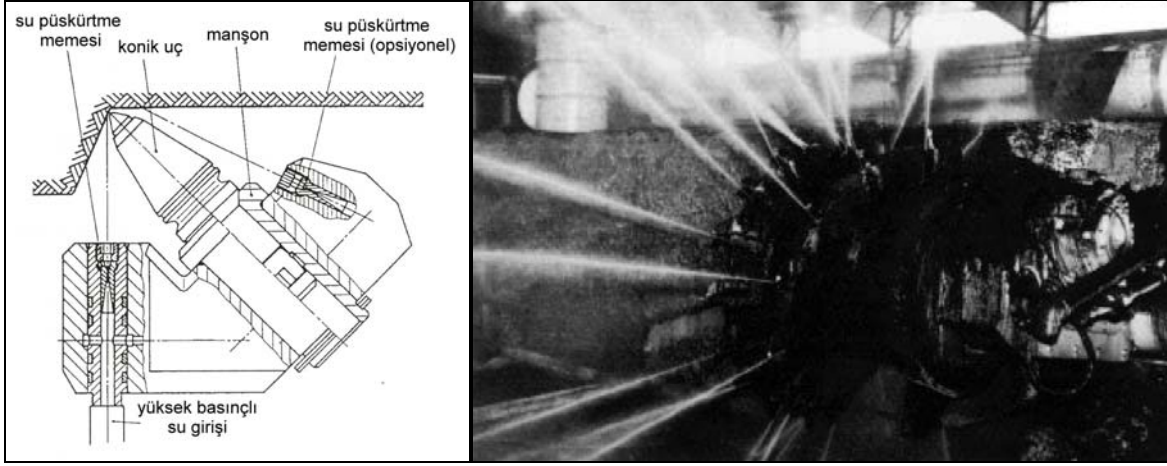


Şekil 5.2. Kömür işletmeciliğinde su demeti kullanımına örnekler (Alçın, 1986'dan alınmıştır)

Su gücünden yararlanılarak yapılan ilk kazı çalışmaları Roma İmparatorluğu zamanına kadar uzanmaktadır. Ekonomik boyuttaki ilk uygulamalar ise bu yüzyılın başında Rusya'da turba kömürlerinin işletilmesinde görülmektedir. Bugün ise başta Rusya, Kanada, Almanya, Japonya ve Çin Halk Cumhuriyeti olmak üzere birçok ülkede, kalın ve yüksek eğimli kömür tabakalarının işletilmesinde yaygın olarak düşük basınçlı yüksek debili su demeti ile hidrolik madencilik yapılmaktadır. Özellikle çok ince ve çok kalın damarlarda ekonomik ve güvenli bir işletme yapma olanağı vermesi gelişmesindeki en önemli etkidir.

Kömür damarının yapısına göre hidrolik madencilik; kısa ayak yöntemi, oda topuk yöntemi, arakatlı göçertme yöntemi ve delme-genişletme yönteminden biri seçilerek gerçekleştirilir. Hidrolik kazının teknik ve ekonomik olarak verimli olması demet basıncı, demet çapı, etkileme uzaklığı, kömürdeki serbest yüzeyler, bu yüzeylere yaklaşma yönü ve kesme hızı gibi etkenlere bağlıdır.

Su demeti kazı işlemlerinde tek başına kullanıldığı gibi tamburlu kesicilere monte edilerek su demeti destekli kazı işlemleri de yapılmaktadır. Keskilere monte edilmiş su demeti örneği ile tamburun çalışma sırasındaki görünümü Şekil 5.3'te verilmektedir (Handewith et al., 1985; Thimons et al., 1987).



Şekil 5.3. Su demeti monte edilmiş tamburlu kesicinin görünümü (Handewith et al., 1985; Thimons et al., 1987).

Kayaçların sadece su demeti ile kazılması için geleneksel mekanik kazıya oranla daha büyük özgül enerji gereksinimi bulunmaktadır. Fakat su demeti mekanik kazıcılarla birlikte kullanıldığında keski ömrünü uzatan avantajlı bir yöntem olmaktadır (Hood, 1975). Böyle bir hibrit sistemin avantajları şöyle sıralanabilir:

- Kesme kuvvetleri azalmaktadır: Fairhurst and Deliac (1986), kesme yönündeki kuvvetlerde ortalama %30 oranında, normal kuvvetlerde ise buna eşit veya daha yüksek oranda bir azalma olduğunu belirtmiştir.
- Kesici uç ömrü uzamaktadır: Taylor and Thimmons (1989), uç ömrünün iki kat arttığını belirtmiştir. 200 MPa basma dayanımına sahip sert kayaç kazısında normalde bir uç ömründen bahsedilemezken su demetiyle birlikte kullanımında kabul edilebilir bir uç ömrü elde edilmiştir (Hood et al., 1991). Morris and MacAndrew (1986) kayaç-karbit uç kantağındaki aşırı stresli ortamı soğuttuğundan uç aşınmalarını azalttığını ileri sürmüşlerdir.
- İlerleme hızı artmaktadır: Normal kuvvetlerdeki azalmalar sebebiyle, makinenin her devrinde önerilen baskı kapasitesine göre daha fazla ilerleme sağlanmaktadır. Ayrıca, su demetiyle birlikte normal kuvvet gereksinimindeki azalma, uçlardaki aşınmalarla birlikte kesme verimindeki kayıpları da karşılamaktadır.
- Makine titreşimi daha düşüktür: Fowel et al. (1988) tünel açma makinelerindeki titreşimlerin önemli ölçüde azaldığını belirtmiştir.

- Daha iri kayaç parçaları elde edilmektedir: Hibrit sistemin kullanılmasıyla ince kırıntıların oranı düşürülürken iri parçaların oranı artırılmıştır.
- Solunabilir toz oranı azaltılmıştır: Taylor et al. (1989) geleneksel su spreylili yöntemlere göre su demetinin birlikte kullanımıyla solunabilir tozun %80 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.
- Yanıcı bileşenlerin bulunma olasılığını düşürmektedir: Kesme çukurundaki su, sürtünmelerden kaynaklanan ısınmaları engelleyerek gaz ateşlenmeleri ihtimalini azaltmaktadır.

5.1.3. Doğal Taş Kesme ve İşlemede Su Demeti Kullanımı

Doğal taş ocak işletmeciliğinde kullanılan su demeti sistemi saf su demetinden oluşmaktadır. Sistem asıl olarak granit ocaklarında kullanılmaktadır. Granit ocaklarında blok üretim maliyetlerinin yüksek oluşu yeni ve ucuz üretim yöntemlerinin araştırılmasına sebep olmuştur. Bu amaçla ilk olarak 1980'li yılların başında su demeti sistemi granit ocaklarında denenmeye başlanmış alınan olumlu sonuçlar neticesinde de on yıl sonra blok üretiminde kullanılmaya başlanmıştır.

Kullanılan su demeti sisteminde 150-200 HP gücünde pompa ile 270 MPa basınçta 27 lt/dk su veya 350 MPa basınçta 7 lt/dk su sağlanmaktadır. Bu yüksek basınçlı su yaklaşık 0.5 mm çaplı püskürtme memesinden geçirilerek yüksek hızlı su demeti elde edilmektedir.

Yüksek hızdaki su demeti granit yüzeyine uygulandığında içerisine nüfuz ederek zayıf mineral sınırlarından ayrılmalara ve kopmalara dolayısıyla parçalanarak aşınmasına sebep olmaktadır. Bu şekilde bir su demetinin salınımı ve aşağı-yukarı hareketiyle de kesim gerçekleştirilmektedir. 6-7 m'lik kol üzerine monte edilen püskürtme memesi su demetini yatayla 45° açı yapacak şekilde kayaca püskürtürken aynı zamanda sağa ve sola salınım yapmaktadır (Şekil 5.4). Salınım hareketiyle birlikte püskürtme memesini taşıyan kolun yaklaşık 5 m/dk'lık aşağı veya yukarı hareketiyle su demeti kayaç içerisinde 5-10 cm kesim aralığı oluşturmaktadır. Kol, aşağı veya yukarı hareketini tamamladığında kayaca 1 cm kadar yaklaştırılır ve kesme işlemine bu şekilde devam edilir. Püskürtme memesinin ve taşıyıcı kolun hareketi tamamıyla elektronik kontrollüdür. Püskürtme memesinin bulunduğu kol bir ray üzerinde ilerleme hareketi yapar ve rayın sonuna

gelindiğinde otomatik olarak durur. Sistem yeni kesim alanına alındıktan sonra kesim işlemine devam edilir.



Şekil 5.4. Granit ocağında kullanılan su demetli kesme makinesi (Ferris and Hall, 2004)

Blok üretiminin tamamıyla su demetiyle yapıldığı ocaklarda, üretilecek blokların dört kenarı kesildikten sonra kamalar veya hava yastıkları yardımıyla tabanı koparılarak blok ana kayadan ayrılmaktadır. Çoğunlukla düşey kesimler su demetiyle yapılmakla birlikte aynı pompaya bağlı iki farklı su demeti sistemi ile hem yatay hem düşey kesimler aynı anda yapılarak üretim hızı artırılabilir.

Su demeti genellikle granit ocaklarında yeni bir basamak oluşturulurken ilk blok kesiminde, soğumayla birlikte oluşan kayaç gerilmelerinin elmaslı teli sıkıştırdığı için kullanılmadığı durumlarda blok üretiminde ve en çok da elmaslı tele yardımcı üretim yöntemi olarak elmaslı teli rahatlıkla içerisinden geçirmek için geniş kesim aralığı oluşturulmak istenen durumlarda kullanılmaktadır. Bu durumda basamak arkasında su demetli kesme sistemi ile kanal açıldıktan sonra bu kanala açılan bir delikten elmas tel geçirilip düşey ve yatay kesimler yapılarak blok üretimi gerçekleştirilir.

Su demetli kesme sistemi yüksek maliyetine karşılık birçok avantaja da sahiptir; delme ve kesme işlemini birlikte yaptığı için kısa sürede üretime başlanır, sağlıklı ve güvenli bir çalışma ortamı sağlar, otomatik çalıştığından sürekli başında bir operatör bulunması gerekmez, çok düzgün ve istenen boyutta blok üretimine

imkan sağlar, kesim sırasında oluşan ince kayaç parçacıkları ocakta iş makineleri için düzgün bir zemin oluşturur.

Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında düzlemsel mermer ürünlerinin mimaride dekoratif ve sanatsal amaçla kullanımı, istenen formların verilmesinin zorluğu sebebiyle sınırlı kalmaktadır. Uygulamalar genellikle kaplama veya döşemede farklı boyutların veya değişik renklerin birlikte kullanımı şeklinde olmaktadır. Bunun temel nedeni klasik kesme yöntemleriyle mermer plakalarından istenen şekillerde ve boyutlarda ürün elde etmenin zorluğudur.

Aşındırıcılı su demeti sistemine artan talebin sebepleri yalnız daha hızlı ve iyi kesim yapması değil aynı zamanda çok karmaşık şekillerin dahi çok dar bir kesim aralığında (1 mm kadar) çok küçük toleranslarla ve hassas kesim kenarlarıyla kesim yapılmasına imkan vermesidir (Şekil 5.5). Dekoratif mermer ürünlerinin üretiminde aranılan bir kesme sistemi olmasının asıl nedeni de bu sayılan üstün yönleridir (Engin, 2006).



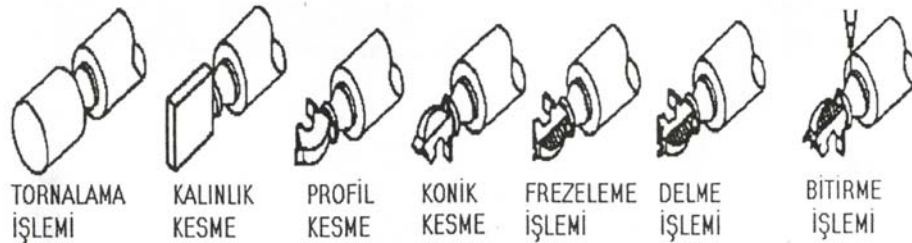
Şekil 5.5. Aşındırıcılı su demetiyle kesilen mermer kompozisyonuna bir örnek

Dekoratif mermer üretiminde kullanılan aşındırıcılı su demetli kesme sistemi, bilgisayar destekli üretimle istenilen her tür desen ve şeklin kesilebilmesine olanak sağladığı için yüksek ilk yatırım maliyetine rağmen kullanım alanında rakipsiz görülmektedir. Gelişen teknolojiyle birlikte su demetli kesme sisteminin mermer sektöründe kullanımının artması beklenmektedir.

Mermer üretiminde ilk aşama mermerin blok halinde ocaklardan çıkarılmasıyla başlamaktadır. Elde edilen bloklar mermer işleme fabrikalarında büyük boyutlu mermer hızarlarıyla (katraklar) veya dairesel testerelerle (blok kesiciler-ST'ler) levhalar halinde kesilmektedir. Bu levhalar, baş kesme, yan kesme ve yarma makineleri adı verilen yine dairesel testereli kesme makineleriyle istenilen ebatlara indirilmektedir. Mermerin blok boyutundan nihai ürün aşamasına kadar olan tüm kesme işlemleri su demetiyle kesim için potansiyel araştırma alanıdır. Mermerlerin su demeti ile kesilebilirliği ve mermer plaka üretiminde su demetinin kullanılabilirliği konularında araştırmaların yapılması ihtiyacı bulunmaktadır.

5.2. İmalat Sanayiinde İleri Su Demeti Uygulamaları

Aşındırıcılı su demeti genellikle kesme amacıyla kullanılmakla birlikte, temelinde katı malzeme aşındırması yaptığı için, kontrollü uygulandığında delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinde de kullanılabilir. Aşındırıcılı su demeti dinamik bir takım olduğu için bu işlemlerin yapılabilmesi için işlem parametreleriyle malzeme uzaklaştırma miktarı arasındaki ilişkiler çok iyi belirlenmelidir. Bu sağlandığı takdirde bütün işlemlerin aynı takımla yapılabilmesi çok avantaj sağlayacaktır. Yapılan uygulamalar Şekil 5.6'da görülmektedir.

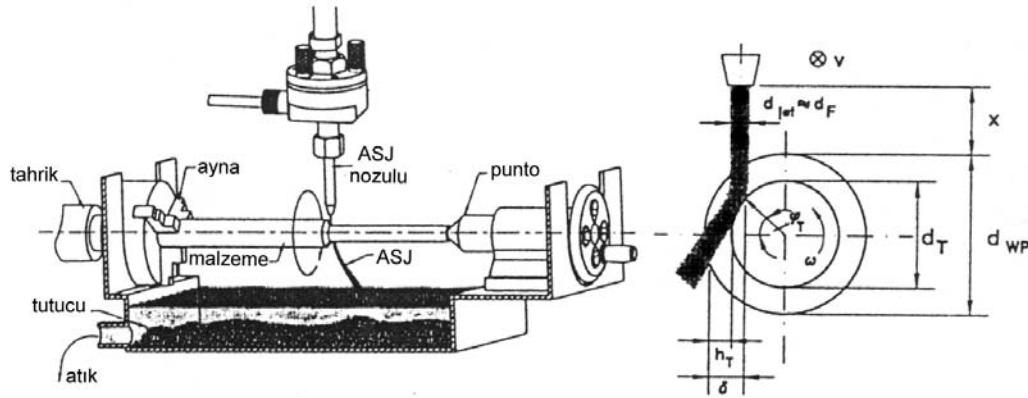


Şekil 5.6. Satranç atının ileri aşındırıcılı su demeti tekniğiyle işlenmesi

Frezeleme, malzeme üzerinde istenen ölçülerde bir oyuk açma işlemidir. Frezeleme, su demetinin malzemeyi tamamen delmesini engelleyerek istenen derinliğe kadar girmesini sağlayarak gerçekleştirilir. Frezelemede en büyük sıkıntı derinlikteki düzensizliklerdir. Bunun önlenmesi yüksek yanal hızların seçilmesi yoluyla etki süresini azaltmak veya düşük enerji yoğunluklu bir demet kullanılmasıyla mümkündür.

Frezelemede dikkat edilecek parametreler; aşındırıcı debisi, yanal hız ve su basıncıdır. Bunlar kontrol edilerek oyma derinliği, yüzey pürüzlülüğü ve dalgalılığındaki istenen kriterler sağlanabilir.

Çok sert alaşımlar, seramikler ve karmaşık metal kompozitleri gibi kesilmesi zor metallerden döner simetrilerin üretimi aşındırıcılı su demetiyle tornalamak suretiyle kolaylaştırılabilir. İşlem, demetin dönen bir parça üzerinde düz bir hat boyunca kaydırılmasıyla gerçekleştirilir (Şekil 5.7).



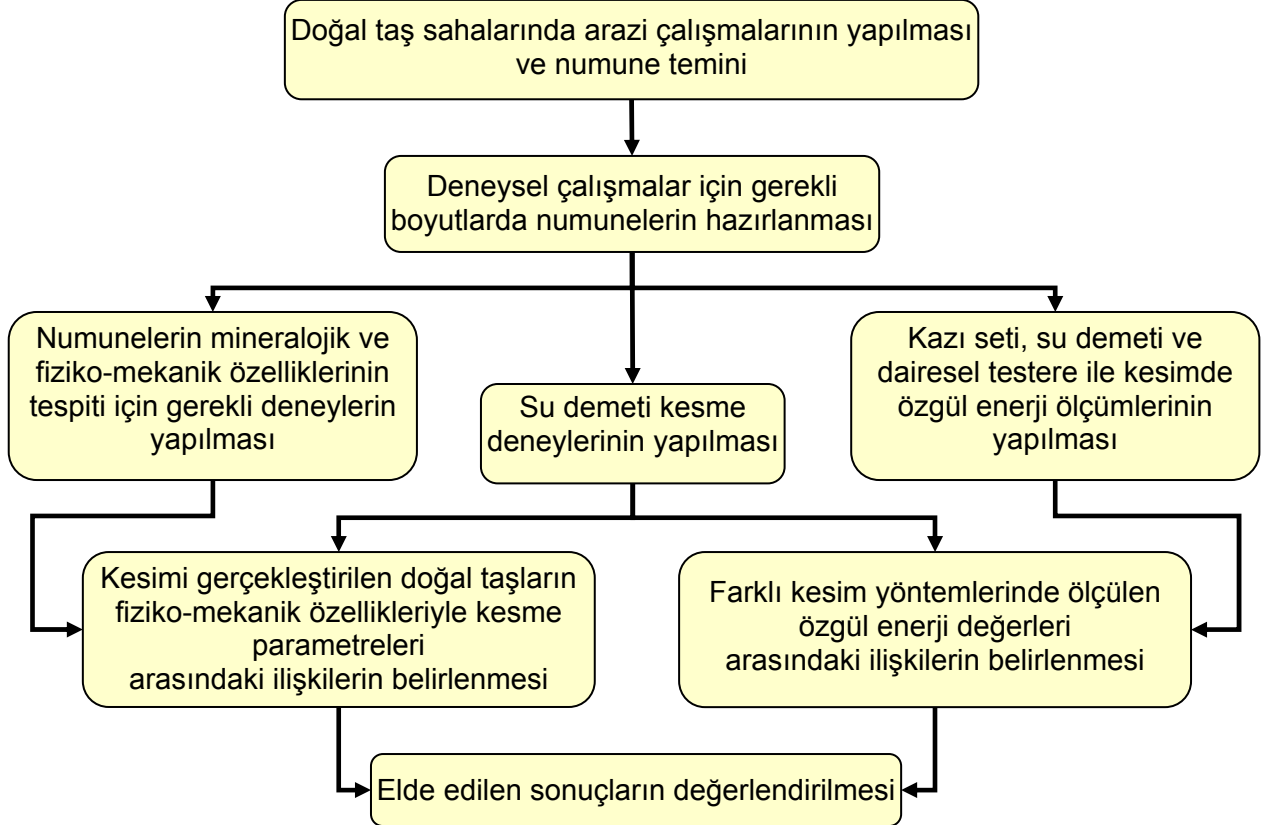
Şekil 5.7. Aşındırıcılı su demeti ile tornalama yöntemi

Aşındırıcılı su demeti ile tornalamanın avantajı, işlenmesi zor olan malzemelerden yapılan hassas millerin çok küçük çaplara kadar işlenmesine olanak sağlayan zayıf kesme kuvvetleridir. Gerilme deneyleri bu yöntemle işlenmiş millerde malzemenin gerilme karakteristiğinde değişiklik olmadığını göstermiştir (Akkurt, 2002).

Aşındırıcılı su demetiyle işlemede yüzeylerin kalitesini belirleyen temel parametreler; kullanılan aşındırıcıların tane boyu ve tanelerin darbe açısıdır. Dolayısıyla düşük aşındırıcı darbe açıları ve tane boyları seçilerek yapılan uygulamalar sonucunda yüzeylerden çok az malzeme uzaklaştırılacak ve parlatma etkisi olacaktır.

6. ARAŞTIRMA MALZEMESİ ve DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında, bazı Türk doğal taşlarının yapı-doku, fiziksel ve mekanik özellikleri ile su demeti kesme parametreleri arasındaki ilişkiler ve kesme parametrelerinin ve kayaç özelliklerinin kesilebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Doğal taş örneklerinin aşındırıcılı su demeti ile kesilebilirliğini belirlemede kesim derinliği ve kesim yüzeylerinin çeşitli özelliklerinin kullanımı araştırılarak bunlar arasındaki ilişkiler ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Ayrıca, en düşük enerji gereksinimi olan kesme yönteminin belirlenmesi amacıyla, kazı seti, su demeti ve dairesel testere ile kesimde özgül enerji ölçümü yapılmış ve farklı kesim yöntemlerinde ölçülen özgül enerji değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Çalışmada öncelikle, kullanılacak doğal taş (mermer) numuneleri sınıflandırılmış, numunelerin seçimi ve teminini içeren arazi çalışmaları ve fiziko-mekanik özelliklerinin tespit edildiği laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde tesiste aşındırıcılı su demeti ile kesme deneyleri ve kazı seti ve dairesel testere ile kesme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda izlenen yöntemin akım şeması Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Araştırma kapsamında yapılacak çalışmalarda izlenecek yollar

Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan doğal taş, makine-teçhizat ve kesme koşulları etmenleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Çizelge 6.1. Aşındırıcılı su demetiyle kesmede etkili olan etmenler

A. Değiştirilemez kayaç etmenleri	B. Yarı değiştirilebilir etmenler
<ul style="list-style-type: none">➤ Kimyasal bileşenleri➤ Mineralojik bileşenleri➤ Mineralojik özellikleri➤ Fiziksel özellikleri<ul style="list-style-type: none">▪ Yoğunluk▪ Gözeneklilik▪ Su emme▪ Sertlik➤ Mekanik özellikleri<ul style="list-style-type: none">▪ Tek eksenli basma dayanımı▪ Elastisite modülü▪ Çekme dayanımı▪ Aşınma dayanımı	<ol style="list-style-type: none">1. Su demetli kesme makinesi etmenleri<ul style="list-style-type: none">➤ Pompa türü ve basıncı➤ Su demeti püskürtme memesi ve özellikleri<ul style="list-style-type: none">▪ Boyu▪ Çapı▪ Geometrisi➤ Püskürtme memesi yanal hızı➤ Püskürtme memesi - malzeme arası mesafe2. Kesme ortam koşulları<ul style="list-style-type: none">➤ Karışım malzemeleri ve kimyasallar➤ Karışım miktarları➤ Uygulanan kesme yöntemi

Bu araştırmada öncelikle karbonat kökenli bazı Türk doğal taşlarının aşındırıcılı su demeti ile kesilebilirliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bilindiği üzere karbonat kökenli doğal taşlar bileşenlerine göre dört gruba ayrılmaktadır;

- a) Gerçek mermerler
- b) Dolomitik mermerler
- c) Kalk silikatik mermerler
- d) Kireçtaşları

Petrografik tanımlamaya göre gerçek mermerler, daha önce var olan bileşiminde %95 üzerinde kalsiyum karbonat içeren kayaçların değişik basınç ve sıcaklık altında kimyasal bileşimi değişmeden yeni yapı ve doku kazanması ve kristalleşmesidir (Kulaksız, 2005). Dolomitik mermerler de gerçek mermerlere benzemekle beraber kimyasal bileşimi dolomit minerallerinden oluşmaktadır. Mermer veya kireçtaşlarının çözünüp, yeniden kristalin yapıda oluşumu olan diki-sarkıt, traverten ve oniksler bu grup içinde yer alırlar. Kalk silikatik mermerler ise kristalin karbonat mineralleri yanında bileşiminde silikat grubu mineraller içeren metamorfik kayaçlar olup, mineral yüzdelere göre değişik şekillerde petrografik

olarak adlandırılmaktadırlar (örneğin, kuvars-diopsit kalk silikatik mermerler). Kireçtaşı grubu doğal taşlar ise karbonat mineral tane boyutuna göre mikritik, sparitik, yarı sparitik-kristalin şeklinde olabilirler. Bu çalışmada mermerler ve kireçtaşlarının yanında mağmatik kökenli doğal taşlardan bazıları da kullanılmıştır. Bu sebeple gerçek mermerlerle karışmaması ve diğer kayaçları da kapsamı amacıyla örnekleri ifade ederken doğal taş terimi kullanılmıştır.

Araştırmada kullanılacak doğal taşlar yapısal özellikleri itibariyle 8 temel gruba ayrılmışlardır. Temel gruplar ve bu gruplar içerisinde yer alan doğal taşlar aşağıda verilmiştir.

1. Gerçek mermerler (Rekristalize %95 kalsiyum karbonat içerikli)
 - a) İnce taneli kristalin
 - b) İnce/orta taneli kristalin
 - c) İri taneli kristalin
2. Dolomitik mermerler
3. Kalksilikatik tip mermerler
4. Kireçtaşları
 - a) Mikritik kireçtaşları
 - b) Sparitik kireçtaşları
 - c) Sparitik/kristalin kireçtaşları
5. Oniks/Traverten grubu doğal taşlar
6. Granitoyit - siyenitoyit topluluğu doğal taşlar
7. Bazik ve ultrabazik (yeşil) kayaçlar
8. Diğer doğal taşlar

6.1. Arazi Çalışmaları

Doğal taş numuneleri arazide üretim yapılan ocaklardan, bunun mümkün olmadığı durumlarda ocaklardan alınan blokların işlendiği doğal taş işleme tesislerinden temin edilerek bu tesislerdeki kesme makinelerinde boyutlandırılarak taşıma için uygun hale getirilmiştir. Doğal taş numunelerinin alındığı bölgeler Şekil 6.2'de gösterilmiştir. Araştırmada kullanılacak doğal taş gruplarından her grup için en az bir örnek alınarak çalışmanın birçok farklı Türk doğal taşını kapsamına gayret edilmiştir. Araştırmada kullanılan doğal taşlar ve bunların ait oldukları gruplar Çizelge 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Doğal taş numunelerinin alındığı bölgeleri gösteren yer bulduru haritası

Çizelge 6.2. Araştırmada kullanılan doğal taşların ticari isimleri ve grupları

Örnek No	Örnek Adı	Grubu	Örnek No	Örnek Adı	Grubu
1	Milas Sedef	1	26	Marmara Dolomitik Mermer	2
2	Milas Limon	1	27	Akhisar Oniks	5
3	Muğla Beyaz	1	28	Denizli Traverten	5
4	Muğla Kristal Beyaz	1	29	Sarı Traverten	5
5	Çobanlar Beyaz	1	30	Küfeki Taşı	8
6	Göktepe Siyah	1	32	Antalya Limra	4
7	Amasya Bej	4	33	Elazığ Vişne	4
8	Sivrihisar Açık Bej	4	34	Elazığ Sunta	4
9	Eskişehir Süpren	1	35	Hazar Pembe	4
10	Milas Leylak	1	36	Hazar Traverten	5
11	Milas Leylak 2	1	37	Papatya Bej	4
12	Afyon Beyaz	1	38	Hazar Koyu Bej	4
13	Afyon Bal	1	39	Temmer Rosalya Pembe	4
14	Afyon Gri	1	40	Afyon Andezit	8
15	Afyon Menekşe	1	41	Yeşilirmak Diyabaz	7
16	Akşehir Siyah	1	42	Akdeniz Yeşili	7
17	Romance Bej	4	43	Beypazarı Granit	6
18	Kaman İncisi	3	44	Aydiner Ligth	6
19	Afyon Ayazini Tüf	8	45	Siyah Büyü	6
20	Bilecik Bej	4	46	İspir Pembe	6
21	Crema TEM	4	47	Aydiner Ayışığı	6
22	Fosilli Bej	4			
23	Uşak Yeşili	1	51	Küfeki Taşı 2	8
24	Ege Bordo	1	52	Emirdağ Traverten	5
25	Uşak Beyazı	1	53	Beytepe Marn	8

Burada kullanılan grup numaraları yukarıda verilen sınıflama kodlarıdır. Örnekler arazi çalışmaları ile değişik zamanlarda alınırken numaralandırılma işlemi

yapılmıştır. Daha sonra hepsine birden sıralı numara vermek çeşitli hatalara ve karışıklığa sebep olabileceği için örnek numaraları olduğu gibi bırakılarak düzeltilmemiştir. Bu sebeple örnek numaralarının hepsi birbirini takip etmemektedir.

Doğal taş örneklerinden numune alınırken blok üretimi yapılan ocaklarda süreksizliklerin en az olduğu alanlar seçilmiştir. Bu doğal taş ocaklarından iki tanesinin genel görünümü Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Muğla-Milas yöresi doğal taş ocağının genel görünümü

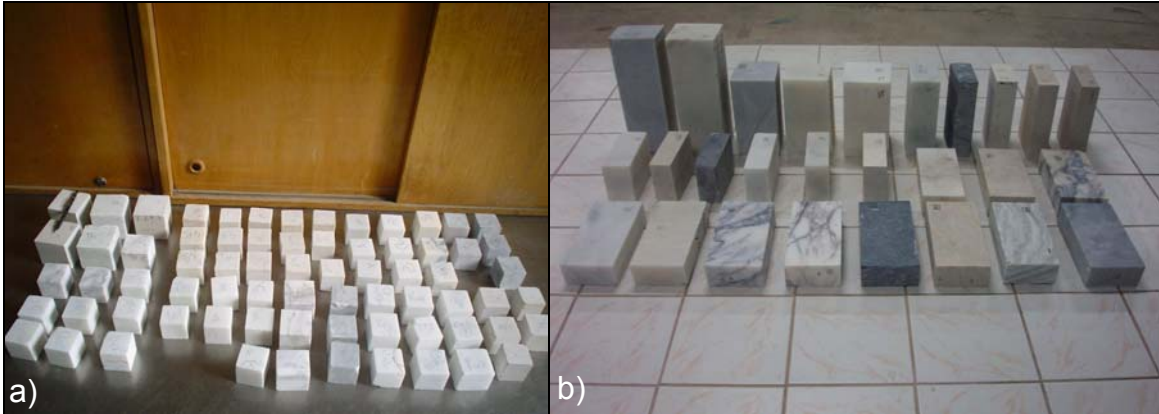


Şekil 6.4. Afyon-İscehisar yöresi doğal taş ocağının genel görünümü

6.2. Laboratuvar Çalışmaları

Arazi çalışmalarıyla elde edilen doğal taş örnekleri, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Kaya Mekaniği ve Mermer Teknolojisi Laboratuvarlarındaki doğal taş kesme makinelerinde kesilerek, TS 699'a uygun boyutlarda ve su demeti kesme uygulamaları için gerekli boyutlarda deney numuneleri olarak hazırlanmıştır. Ayrıca küçük boyutlu kesme deney setinde ve dairesel testereli doğal taş kesme makinesinde kesme deneyleri yapmak üzere de deney numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 6.5).

Arazi çalışmalarıyla temin edilen doğal taş numunelerinin yapısal özellikleri ile su demetiyle kesilebilirlikleri arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için TS 699 ve ISRM standartlarına uygun olarak belirli bazı laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, yine Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Kaya Mekaniği ve Mermer Teknolojisi Laboratuvarlarında su demeti ile kesilebilirlikte etkili olabileceği düşünülen doğal taş özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.



Şekil 6.5. Laboratuvar (a) ve kesme deneyleri (b) için hazırlanan bazı örnekler

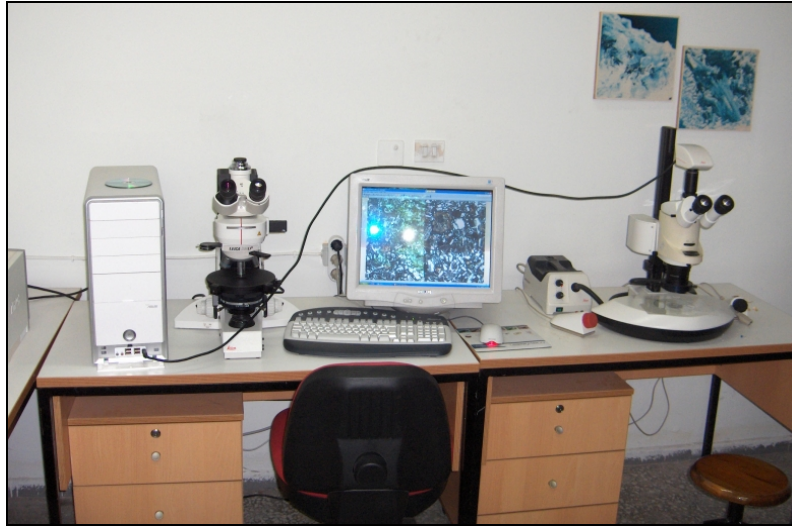
Bu amaçla laboratuvarında yapılması planlanan mineralojik, petrografik ve fiziko-mekanik deneyler aşağıda verilmiştir;

- a) Mineralojik-petrografik analizler,
- b) Birim hacim ağırlık,
- c) Su emme,
- d) Görünür gözeneklilik,
- e) Shore scleroscope sertliği,
- f) Koni delici sertliği,

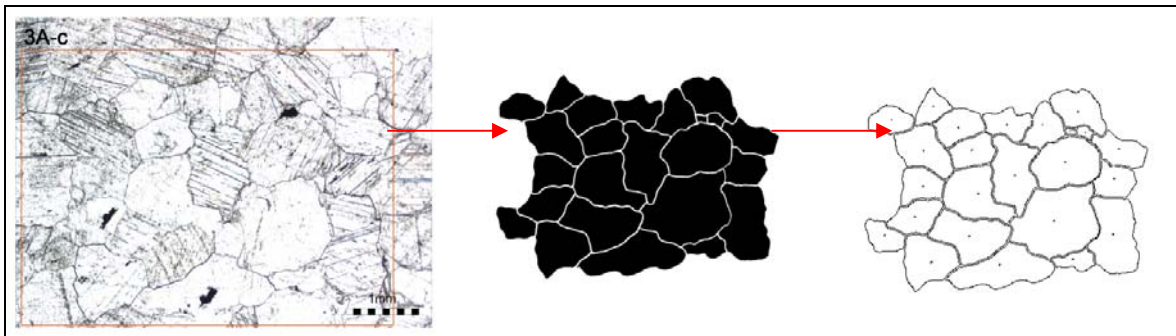
- g) Tek eksenli basma dayanımı,
- h) Çekme dayanımı,
- i) Elastisite modülü,
- j) Böhme yüzey aşınma dayanımı.

6.2.1. Mineralojik-Petrografik Özelliklerin Tespiti

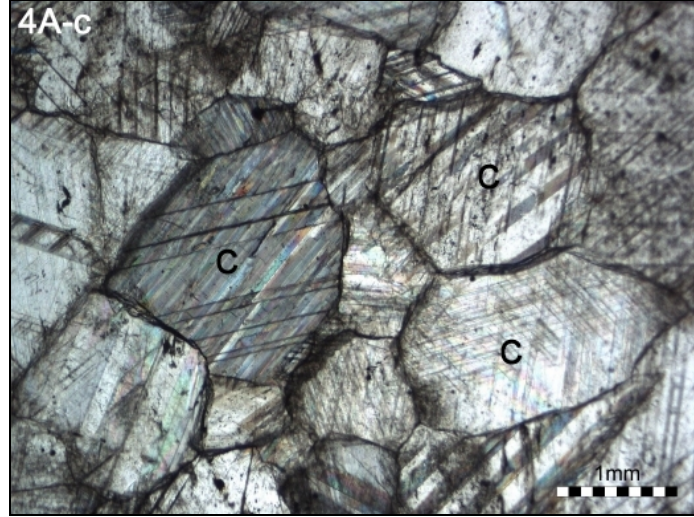
Alınan doğal taş örneklerinin petrografik incelemelerinin yapılması için örneklerin ince kesitleri hazırlanmış ve Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde bulunan LEICA marka görüntü analiz cihazıyla (Şekil 6.6) fotoğrafları çekilmiştir. Fotoğraflarda bulunan kalsit mineralleri ImageJ isimli görüntü analiz programı yardımıyla tanımlanmış, sınırları belirlenerek yüzey alanları hesaplanmış ve tane boyut dağılımları belirlenmiştir. Fotoğrafların değerlendirilmesine örnek Şekil 6.7’de verilmiştir. Bazı ince kesit örneklerinde tane boyutu ile ilgili görüntüler Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’de verilmektedir.



Şekil 6.6. Araştırmada kullanılan LEICA marka görüntü analiz cihazı



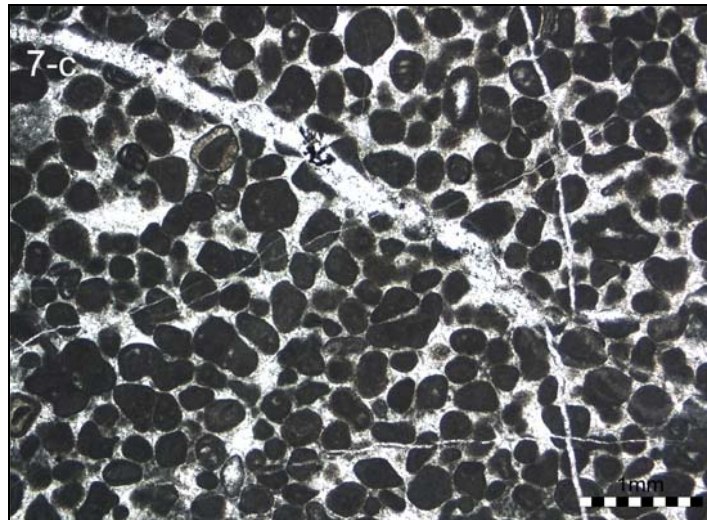
Şekil 6.7. ImageJ görüntü analiz programı yardımıyla tane boyu karakterizasyonu



Şekil 6.8. Muğla Beyaz mermer örneğinin ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)
C: Kalsit kristali (dilinimli ikizlenmeli)



Şekil 6.9. Sparitleşmiş fosilli kireçtaşı örneğinin (Fosilli Bej) örneğinin ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)



Şekil 6.10. Mikritik oolitik kireçtaşı örneğinin (Amasya bej) ince kesit fotoğrafı (Objektif: x 2,5)

Diğer doğal taş örneklerinin ince kesit fotoğrafları ve petrografik tanımlamaları Ek 1'de verilmiştir. Su demetiyle doğal taşların kesilebilirliğine etkisinin ne şekilde olabileceğinin araştırılması amacıyla, doğal taş örnekleri üzerinde yapılan petrografik incelemelerde, kalsit mineral tanelerinin tane büyüklüğü tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Mermer örneklerinde kristal tane büyüklükleri

Örnek No	Tane Büyüklüğü (µm)				
	Ortalama	Standart sapma	En küçük	En büyük	Orta değer
1	103	121	0	249	40
2	285	231	47	470	291
3	420	338	78	712	345
4	608	540	207	997	457
5	484	472	122	981	197
6	99	84	0	166	59
9	156	135	64	280	99
10	277	249	44	539	154
11	54	67	18	175	31
12	204	176	80	411	103
14	117	104	18	203	59
15	150	126	50	276	67
23	110	101	40	216	69
25	369	357	59	687	124
26	31	25	0	50	25

Ortalama tane büyüklüğü 26 nolu Marmara Dolomit örneğinde en düşük, 4 nolu Muğla Beyaz örneğinde ise en yüksek değerde tespit edilmiştir.

6.2.2. Örneklerin Fiziko Mekanik Özelliklerin Tespiti

Bu çalışma kapsamında, doğal taş örneklerinde; birim hacim ağırlık, su emme, tek eksenli basma dayanımı, elastisite modülü, çekme dayanımı, shore scleroscope ve koni delici sertliği, böhme yüzey aşınma dayanımı deneyleri yapılmıştır.

6.2.2.1. Birim hacim ağırlığı, su emme oranı ve görünür gözenekliliğin tayini

Su demeti ile kesimde aşındırıcı tanelerin ve su zerrecilerinin sahip oldukları momentumun kesilen malzemeye aktarımında kesilen malzemenin birim hacim ağırlığı önem kazanmaktadır. Kaldırılan talaş miktarı malzemenin birim hacim

ağırlığı arttıkça hacimsel olarak azalmaktadır. Bu nedenle doğal taşların birim hacim ağırlığı ve su emme oranları TS 699'a göre yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Burada 'birim hacim ağırlığı' terimi TS 699'a göre ifade edilmektedir.

Deney örneklerinin birim hacim ağırlıkları, su emme miktarları ve görünür gözeneklilik deney sonuçları Çizelge 6.4'de toplu olarak verilmektedir.

Çizelge 6.4. Doğal taş örneklerinin birim hacim ağırlık ve su emme ve görünür gözeneklilik deney sonuçları

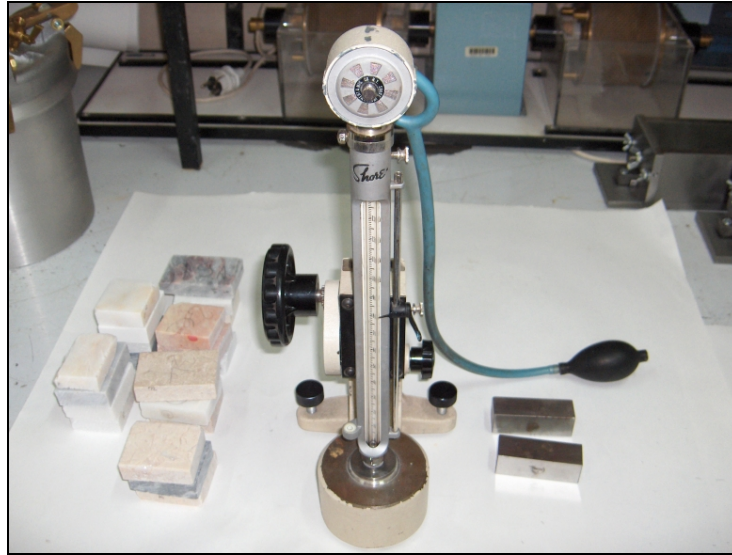
Örnek No	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Su Emme (%)	Görünür Gözeneklilik (%)	Örnek No	Birim Hacim Ağırlığı (g/cm ³)	Su Emme (%)	Görünür Gözeneklilik (%)
1	2,724	0,023	0,062	24	2,751	0,075	0,208
2	2,715	0,057	0,155	25	2,709	0,059	0,161
3	2,702	0,049	0,132	26	2,828	0,186	0,527
4	2,706	0,042	0,113	27	2,716	0,078	0,211
5	2,712	0,065	0,176	28	2,408	2,001	4,820
6	2,741	0,166	0,454	29	2,540	1,020	2,590
7	2,682	0,072	0,194	30	1,950	11,780	22,910
8	2,698	0,172	0,462	32	2,377	3,011	7,156
9	2,721	0,110	0,299	33	2,690	0,700	1,860
10	2,725	0,085	0,231	34	2,510	2,060	5,150
11	2,758	0,112	0,308	35	2,670	0,460	1,230
12	2,707	0,071	0,191	36	2,530	1,460	3,620
13	2,710	0,062	0,169	37	2,690	0,480	1,290
14	2,712	0,042	0,114	38	2,690	0,140	0,360
15	2,717	0,084	0,229	39	2,680	0,180	0,490
16	2,708	0,109	0,295	40	2,119	4,900	10,381
17	2,640	0,464	1,224	41	2,880	0,120	0,120
18	2,767	0,161	0,446	42	2,929	0,339	0,994
19	1,510	17,350	26,000	43	2,660	0,468	1,244
20	2,693	0,133	0,359	44	2,607	0,486	1,267
21	2,660	0,330	0,860	45	2,673	0,059	0,157
22	2,650	0,520	1,390	46	2,590	0,617	1,597
23	2,722	0,091	0,248	47	2,604	0,276	0,719

Gerçek mermer örneklerinde birim hacim ağırlığı yüksek, su emme oranları ve görünür gözeneklilik değerleri düşükken; kireçtaşı, andezit ve tuf örneklerinde gittikçe azalan birim hacim ağırlığı ve artan su emme oranı ile görünür gözeneklilik değerleri görülmektedir.

6.2.2.2. Shore Scleroscope ve Koni Delici sertliğinin belirlenmesi

Aşındırıcılı su demetiyle doğal taşların kesilebilirliği üzerinde doğal taşların sertliğinin etkisinin ve varsa ilişkilerinin hangi boyutta olabileceğinin araştırılması hedeflenmiştir.

Doğal taş örneklerinin sertliği öncelikle Shore Scleroscope (C Tipi) aleti ile (Şekil 6.11) belirlenmiştir. Shore sertliğinin ölçümü amacıyla 5x7x1cm boyutlarında doğal taş örnekleri kesilmiş ve bunların yüzeyleri zımpara tozuyla aşındırılarak ölçümlere hazırlanmıştır. Daha sonra her bir örnek yüzeyinde en az 20 ölçüm alınarak bunların ortalaması ölçüm değeri olarak kaydedilmiştir. Shore Scleroscope sertlik ölçümü deney sonuçları Çizelge 6.5’de verilmiştir.



Şekil 6.11. Shore Scleroscope (C Tipi) sertlik ölçüm aleti

Deneyler sonucunda, 19 nolu Afyon tufu en düşük, 41 nolu Yeşilirmak diyabaz örneğinin en yüksek sertlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Shore sertlik değerlerine göre örnekler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) 44 ve altı (12, 14, 15, 19, 25, 28, 30, 32 nolu örnekler): Tuf ve benzeri yumuşak kayalar ile bazı hakiki mermerler bu gruba girmektedir.
- b) 45-55 arası (1, 2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 16, 18, 23, 24, 26, 27, 29, 33, 35, 36, 40 nolu örnekler): Petrografik isimlendirme ile hakiki mermerler ile Afyon andeziti ve travertenler bu gruba girmektedir.
- c) 56-66 arası (7, 8, 17, 20, 21, 22, 34, 37, 38, 39 nolu örnekler): Bu kategorideki tüm kayaları mikritik kireçtaşları teşkil etmektedir.

d) 85 ve üstü (41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 nolu örnekler): Diyabaz ve granit grubu kayalar bu kategoride yer almaktadır.

Çizelge 6.5. Doğal taş örneklerinin Shore Scleroscope sertlik deney sonuçları

Örnek No	Shore Scleroscope Sertliği	Örnek No	Shore Scleroscope Sertliği	Örnek No	Shore Scleroscope Sertliği
1	52,9	17	56,7	34	57,8
2	46,9	18	53,1	35	51,0
3	45,4	19	14,6	36	49,2
4	47,9	20	60,2	37	64,0
5	49,5	21	62,5	38	59,0
6	47,5	22	60,8	39	61,3
7	66,2	23	48,1	40	45,6
8	58,5	24	55,0	41	110,2
9	53,0	25	42,0	42	101,2
10	54,0	26	50,4	43	97,6
11	53,7	27	53,9	44	86,5
12	44,2	28	42,5	45	105,8
13	51,8	29	49,2	46	108,3
14	44,5	30	18,7	47	102,7
15	44,5	32	35,8		
16	51,3	33	54,7		

Özellikle kayaların mekanik kazısında kazılabilirlik tayininde önemli bir veri sağlamasından dolayı, ayrıca aşındırıcılı su demetiyle doğal taşların kesilebilirliği üzerindeki etkisinin araştırılması amacıyla numunelerin bir kısmında Koni Delici sertlik ölçümü de yapılmıştır.

Koni delici sertlik ölçümü için öncelikle 12x12x6mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra sertlik ölçümleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesinde gerçekleştirilmiştir. Buradaki iş yoğunluğu nedeniyle tüm örneklerde sertlik ölçümü yapılamamıştır. Deney sonuçları Çizelge 6.6'da verilmiştir.

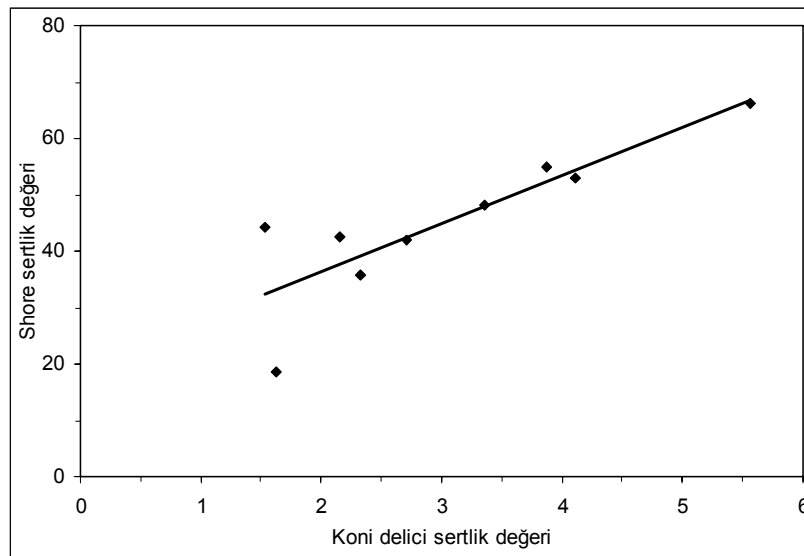
Örnekler içinde en yüksek sertlik değeri mağmatik kökenli doğal taşlarda görülmektedir. Daha sonra ise sırasıyla mikritik kireçtaşları, diğer kireçtaşları, gerçek mermerler gelmektedir. Küfeki taşı ve tuf en düşük sertlik değerine sahip

doğal taşlardır. Marmara dolomitik mermerinin (26 nolu) koni delici sertlik değeri beklenenden çok yüksek çıkmıştır. Diğer dayanım değerleri düşük olduğundan bu örnekten alınan sonuçlar diğer analizlerde dikkate alınmamıştır.

Çizelge 6.6. Bazı Türk doğal taş örneklerinin Koni Delici sertlik deney sonuçları

Numune No	M ₀	M ₁	P _s	I _M	Ort. I _M
1	5,92	7,38	0,29	4,38	4,12
	5,82	7,40	0,33	3,85	
7	5,53	7,05	0,26	4,94	5,57
	5,55	7,08	0,21	6,19	
12	5,63	7,75	0,86	1,49	1,53
	5,65	7,73	0,81	1,57	
23	5,88	7,55	0,40	3,14	3,36
	5,93	7,55	0,36	3,58	
24	6,18	7,75	0,31	4,16	3,87
	6,13	7,75	0,36	3,58	
25	5,78	7,60	0,56	2,29	2,71
	5,78	7,45	0,41	3,13	
26	6,15	7,58	0,16	8,19	8,19
	6,13	7,55	0,16	8,19	
28	5,70	7,60	0,63	2,00	2,15
	5,70	7,50	0,53	2,30	
30	6,15	8,20	0,78	1,63	1,63
	6,10	8,15	0,78	1,63	
32	6,00	7,75	0,46	2,65	2,33
	5,98	7,88	0,63	2,00	

Koni delici sertlik değerleri ile Shore sertlik değerleri kayaç türlerinde paralellik göstermektedir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Shore sertliği ile Koni delici sertliği arasındaki ilişki

6.2.2.3. Tek eksenli basma dayanımı ve Elastisite Modülünün belirlenmesi

Doğal taşların aşındırıcılı su demeti ile kesiminde kesilen malzemenin dayanımının kesilebilirliğine etkisinin incelenmesi amacıyla TS 699'a uygun olarak doğal taşların tek eksenli basma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Deneyler Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü Kaya Mekaniği Laboratuvarındaki hidrolik preste gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin tek eksenli basma dayanımlarının belirlenmesiyle birlikte deneylerin yapımı sırasında aynı zamanda birim uzamayı ölçmekte kullanılan LVDT cihazı ile birim deformasyonlar kaydedilerek elastisite modülü hesaplamaları da yapılmıştır.

Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü deney sonuçları topluca Çizelge 6.7'da verilmektedir.

Çizelge 6.7. Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü deney sonuçları

Örnek No	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Örnek No	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
1	100,4	33,4	7,0	24	81,3	10,9	10,1
2	87,5	22,1	7,8	25	76,2	10,1	6,3
3	69,5	12,5	6,1	26	157,9	13,8	7,2
4	73,1	13,3	8,4	27	70,2	11,1	5,9
5	64,9	11,9	6,6	28	35,5	5,7	2,6
6	113,7	23,3	8,4	29	49,6	8,6	7,6
7	140,9	15,8	8,1	30	15,3	3,2	2,0
8	130,3	23,0	10,0	32	97,8	12,7	5,5
9	95,0	16,7	9,5	33	97,8	12,7	5,5
10	89,1	17,2	8,5	34	94,5	19,7	8,5
11	128,4	17,4	8,1	35	78,4	14,8	5,8
12	79,7	14,2	5,9	36	110,3	26,1	8,1
13	88,8	19,1	6,6	37	71,1	19,5	6,3
14	82,1	15,8	5,4	38	126,8	16,6	10,1
15	81,2	18,6	6,1	39	61,4	16,9	5,7
16	85,4	12,1	8,2	40	70,4	15,8	4,2
17	118,0	16,4	8,1	41	256,4	62,2	26,9
18	60,5	6,1	6,5	42	133,9	22,4	11,0
19	13,6	2,6	1,1	43	75,3	19,8	10,7
20	130,9	14,4	10,7	44	79,9	21,5	5,0
21	86,9	27,5	8,5	45	129,6	36,4	5,5
22	138,4	15,8	10,1	46	158,7	45,9	10,4
23	98,0	12,4	8,7	47	109,6	26,8	9,3

Kayaçlar tek eksenli basma dayanımlarına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır (ISRM, 1981; Ulusay, 1989):

1-5 MPa	→ Çok Düşük Dayanımlı
5-25 MPa	→ Düşük Dayanımlı
25-50MPa	→ Orta-Düşük Dayanımlı
50-100 MPa	→ Orta Dayanımlı
100-250 MPa	→ Yüksek Dayanımlı
> 250 MPa Çok	→ Çok Yüksek Dayanımlı

Yukarıdaki sınıflamaya göre 19, 30 nolu örnekler “düşük dayanımlı”, 28, 29 nolu örnekler “orta-düşük dayanımlı”, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 21, 23, 24, 25, 27, 32, 33, 34, 35, 37, 39, 40, 43, 44 nolu örnekler “orta dayanımlı”, 6, 7, 8, 11, 17, 20, 22, 26, 36, 38, 41, 42, 45, 46, 47 nolu örnekler “yüksek dayanımlı”, 41 nolu örnek “çok yüksek dayanımlı” sınıfında yer almaktadır.

Doğal taşlardan; tüf, killi traverten türü doğal taşların düşük dayanımlı, Orta-iri taneli kristalin mermerler ile dalgalı yazıtlı Güneydoğu Anadolu kireçtaşlarının orta dayanımlı, dalgalı yazıtı seyrek olan kireçtaşları ile mağmatik kayaçların yüksek dayanımlı olduğu görülmektedir.

6.2.2.4. Böhme yüzey aşınma dayanımının belirlenmesi

Aşındırıcılı su demetiyle kesme uygulamasında asıl kesme işlemi yapan unsur su demeti içinde bulunan aşındırıcı tanecikleridir. Kesme işlemi de esasında bu tanelerin gerçekleştirdiği erozyon vasıtasıyla olmaktadır. Serbest aşındırıcı tanelerin kayaç yüzeylerinde oluşturacağı aşınmayı temsil edebilecek deneylerin başında Böhme yüzey aşınma dayanımı deneyi gelmektedir.

Bu amaçla doğal taş numuneleri üzerinde TS 699’da belirtildiği şekilde standard aşındırıcı kullanılarak Böhme yüzey aşınma dayanımı deneyi yapılmış ve Çizelge 6.8’teki sonuçlar elde edilmiştir.

Böhme yüzey aşınma dayanımları incelendiğinde; kristalin mermerlerde aşınma miktarı 11,0-16,10 cm³/50cm² arasında, kireçtaşlarında (bej mermerlerde) 5,00-9,16 cm³/50cm² arasında, travertenlerde ise 17,72-26,22 cm³/50cm² arasında bulunmuştur. Kireçtaşlarından Limra ve Afyon Andezitleri de yüksek aşınma değerleri göstermektedir. Bu iki doğal taşta görülen farklılıklar, Limrada kısmen

kristalin yapı ve gözenekten, Afyon Andezitinde ise kayada yer alan mineral bozunmalarından kaynaklanmaktadır. Mağmatik kayalardan siyenit-granit-diyabaz türü kayalarda ise aşınma miktarları $5 \text{ cm}^3/50\text{cm}^2$ değerinin altındadır.

Çizelge 6.8. Doğal taş örneklerinin Böhme yüzey aşınma dayanımı deney sonuçları

Örnek No	Böhme Yüzey Aşınma Miktarı ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$)	Örnek No	Böhme Yüzey Aşınma Miktarı ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$)	Örnek No	Böhme Yüzey Aşınma Miktarı ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$)
1	11,01	17	9,50	34	11,83
2	11,39	18	5,76	35	6,93
3	14,41	19	28,56	36	21,33
4	14,63	20	9,16	37	7,20
5	15,88	21	5,00	38	11,07
6	12,84	22	5,60	39	7,72
7	7,16	23	14,79	40	24,67
8	6,38	24	12,17	41	3,05
9	14,36	25	14,77	42	6,88
10	13,26	26	19,28	43	5,02
11	12,57	27	10,41	44	3,15
12	14,73	28	17,72	45	4,43
13	9,69	29	21,15	46	5,35
14	16,12	30	26,22	47	3,84
15	16,00	32	22,10		
16	14,67	33	11,33		

Böhme aşınma dayanım değerlerine göre yüksek dayanımlı kayalar granit-siyenit-diyabaz ailesi topluluğu olup bu durum tek eksenli basma dayanımı ile uyumluluk göstermektedir. Aynı şekilde kireçtaşı türü mermerlerde de paralellik söz konusudur. Güneydoğu Anadolu kireçtaşlarında görülen sapmalar kayacın yapısında yer alan süreksizliklerden (özellikle dalgalı yazıt / tabakalanma düzlemleri) kaynaklanmaktadır.

6.3. Aşındırıcılı Su Demetli Kesim Makinesi ile Pilot Kesim Deneyleri

Pilot kesim çalışmaları İstanbul Ümraniye IMES sanayi sitesinde faaliyet gösteren CT Kesme Teknolojileri isimli firma ile yine İstanbul'da Yukarı Dudullu'da faaliyet gösteren TOLKA Waterjet & Decoration isimli firmada gerçekleştirilmiştir. Her iki firmada da kullanılan makineler CT Kesme Teknolojileri isimli firmanın imal ettiği ve fason kesim amacıyla kullandıkları aşındırıcılı su demeti kesim makineleridir.

Hazırlanan doğal taş numuneleri bu makinelerde kesilerek, malzeme özellikleri ve kesme parametrelerinin kesilebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

6.3.1. Deneylede Kullanılan Aşındırıcılı Su Demetli Kesim Makinelerinin Özellikleri

Bu makineler temel olarak; yüksek basınç pompası, aşındırıcılı su demeti püskürtme memesi, kontrol ünitesi, aşındırıcı besleme ünitesi, kesim yapılan tezgahtan oluşmaktadır. Kesme deneylerinde kullanılan aşındırıcılı su demeti kesme makinesinin genel görünümü Şekil 6.13'de, temel parçaları ise Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6.13. Aşındırıcılı su demeti kesme makinesinin genel görünümü



Şekil 6.14. Aşındırıcılı su demeti kesme makinesinin temel bileşenleri (a: yüksek basınç pompası, b: aşındırıcılı su demeti birimi, c: aşındırıcı besleme birimi, d: kontrol birimi)

Kullanılan aşındırıcılı su demeti kesme makinelerinin teknik özellikleri aşağıda verilmiştir;

Su püskürtme memesi çapı /

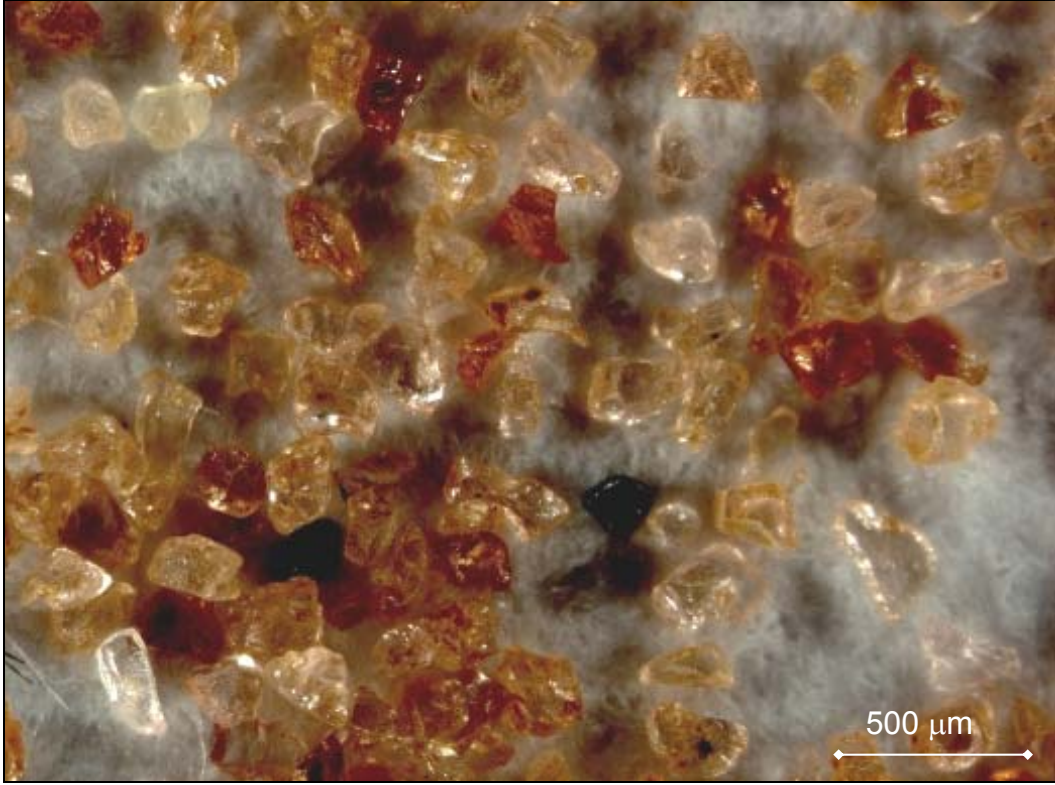
Odaklama tüpü çapı	: 0,25 mm/0,76 mm ; 0,35 mm/1,1 mm
Odaklama tüpü boyu	: 80 mm
Çalışma basıncı	: 50 - 415 MPa
Su debisi	: 3,8 lt (50 MPa için) – 1,0 lt (415 MPa için)
Pompa gücü	: 37 kW (50HP) (Ingersoll Rand SL IV 50 Plus)
Pompa tipi	: Basınç yükselticili
Aşındırıcı tipi	: Supreme Garnet (granat), Hindistan malı, 80# (~250 µm) tane boylu

Kullanılan granatın tane boyu dağılımı ise elek analizi yapılarak tespit edilmiştir (Çizelge 6.9).

Çizelge 6.9. Kesme deneylerinde kullanılan aşındırıcı malzemenin (granat) tane boyu dağılımı

Elek açıklığı Meş (mikron)	%
+ 42 (355)	0,1
42 (355)-48 (300)	2,2
48 (300)-60 (250)	32,0
60 (250)-65 (212)	46,3
65 (212)-80 (180)	16,9
80 (180)-100 (150)	2,4
- 100 (150)	0,1

Kesme uygulamalarında aşındırıcı malzeme olarak kullanılan granat mineralinin mikroskobik görüntüsü ise Şekil 6.15'de verilmiştir.



Şekil 6.15. Supreme Garnet (Hindistan) ticari isimli aşındırıcı granat mineralinin mikroskop görünümü (büyütme: x40)

Granat örnekleri üzerinde yapılan çalışmalarda, fotoğraf görüntüleri üzerinde Şekil 2.18 ve Eşitlik 2.4. yardımıyla şekil faktörü belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda tanelerin şekil faktörü en düşük 0,58, en yüksek 0,75, ortalama olarak da 0,66 olarak hesaplanmıştır.

6.3.2. Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Deneğinde Makine Kesme Koşulları

Kesme deneylerinde; pompa basıncı, aşındırıcı su demeti püskürtme memesi çapı, aşındırıcı besleme miktarı, püskürtme memesi ilerleme hızı, püskürtme memesi-malzeme arası mesafe (durma mesafesi) değiştirilerek bunların doğal taş kesilebilirliğine etkileri araştırılmıştır. Tüm bu çalışma koşulları Çizelge 6.10'da özet olarak verilmiştir.

Kesme deneyi örneklerinin hazırlanması:

Arazi çalışmalarıyla elde edilen doğal taş örnekleri, Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Kaya Mekaniği ve Mermer Teknolojisi Laboratuvarlarındaki doğal taş kesme makinelerinde kesilerek 2 cm x 10 cm x 20 cm, 5 cm x 10 cm x 20 cm, 10 cm x 10 cm x 20 cm, 12 cm x 10 cm x 10 cm, 16 cm x 10 cm x 10 cm ve

20 cm x 10 cm x 10cm boyutlarında hazırlanmışlardır. Böylece aşındırıcılı su demeti kesme makinesinde kesilmek üzere 2 cm, 5 cm, 10 cm, 12 cm ve 16 cm, 20 cm kalınlıklarında değişik yörelerden alınan farklı özelliklere sahip doğal taş numuneleri hazırlanmıştır.

Çizelge 6.10. Kesme deneylerinde seçilen kesme parametrelerinin değerleri

	Doğal taş Kalınlığı (cm)	Pompa Basıncı (MPa)	Yanal Kesme Hızı (mm/dk)	Aşındırıcı Besleme Miktarı (g/dk)	Püskürtme Memesi-Malzeme arası mesafe (mm)
Koparma kesimleri	5 (Sabit) (tüm örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	40, 60, 80, 100, 120, 200	500 (Sabit)	5 (Sabit)
	5 (Sabit) (tüm örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	200 (Sabit)	500, 620, 720	5 (Sabit)
	2, 10, 12, 16 (belirli örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	15, 25, 35, 40, 60, 500, 700	500 (Sabit)	5 (Sabit)
Koparmadan yapılan kesimler	5 (Sabit) (tüm örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	800 (Sabit)	500 (Sabit)	5 (Sabit)
	5 (Sabit) (belirli örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	800, 1000, 1200, 2000, 3000	450 (Sabit)	5 (Sabit)
	5 (Sabit) (belirli örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	Sabit (800mm/dk)	200, 375, 450	5 (Sabit)
	5 (Sabit) (belirli örnekler için yapıldı)	90, 360, 380	Sabit (800mm/dk)	450 (Sabit)	5 (Sabit)
	5 (Sabit) (belirli örnekler için yapıldı)	360 (Sabit)	Sabit (800mm/dk)	450 (Sabit)	3, 5, 10, 20, 30, 50, 80

Doğal taşların aşındırıcılı su demeti ile kesilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla öncelikle tüm doğal taş çeşitleri için hazırlanan 5 cm kalınlığındaki (50 mm \pm 0,5 mm) numuneler sabit pompa basıncında, sabit püskürtme memesi ilerleme hızında ve sabit aşındırıcı besleme miktarında kesilerek doğal taşların yapısal özelliklerinin kesilebilirlikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu işlem tüm doğal taş numuneleri için iki farklı püskürtme memesi ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. İlk durumda püskürtme memesi ilerleme hızı düşük seçilerek

tüm numunelerde koparma kesimi yapılmış ikinci durumda ise püskürtme memesi yanal hızı çok yüksek tutularak aşındırıcı su demetinin malzemeyi koparmadan belli bir derinliğe nüfuz etmesi sağlanmıştır.

Koparma kesimi yapılan uygulamada, püskürtme memesi yanal hızının etkisinin incelenmesi amacıyla doğal taş kalınlığı ve aşındırıcı besleme miktarı sabit tutularak farklı hızlarda (40 mm/dk, 60 mm/dk, 80 mm/dk, 100 mm/dk, 120 mm/dk, 200 mm/dk) kesim yapılmıştır. Benzer şekilde aşındırıcı besleme miktarının kesime etkisini incelemek amacıyla ise doğal taş kalınlığı ve kesim hızı sabit tutularak farklı aşındırıcı besleme miktarlarında (500 g/dk, 620 g/dk, 720 g/dk) kesim yapılmıştır.

Bunlara ek olarak doğal taş örneklerinin kalınlıklarıyla, kesim hızı ve aşındırıcı besleme miktarı arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amacıyla, 2 cm, 5 cm, 10 cm, 12 cm ve 16 cm kalınlığındaki doğal taş örneklerinde de farklı püskürtme memesi yanal hızlarında ve aşındırıcı besleme miktarlarında kesim yapılmıştır. Aşındırıcı su demetiyle yapılan kesme uygulamalarından bazı görüntüler Şekil 6.16 ve Şekil 6.17'de verilmektedir.

İkinci tip kesme uygulamalarında, öncelikle 5 cm kalınlığındaki bütün doğal taş örnekleri aynı aşındırıcı besleme miktarında ve pompa basıncında, 800mm/dk ilerleme hızında kesilerek oluşan kesme derinliğindeki farklılıklar incelenmiş ve malzeme özelliklerinin kesme derinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Daha sonra aşındırıcı besleme miktarı değiştirilerek kesme derinliğine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 200 g/dk, 375 g/dk, 450 g/dk aşındırıcı beslemelerinde kesim uygulamaları yapılmıştır.

Ayrıca püskürtme memesi yanal hızı değiştirilerek farklı ilerleme hızları için kesme derinliklerindeki değişimler de incelenmiştir. Bu amaçla 800 mm/dk, 1000 mm/dk, 1200 mm/dk, 2000 mm/dk, 3000 mm/dk'lık yanal hızlarda kesme uygulamaları yapılmıştır.

Pompa basıncının etkisinin incelenmesi amacıyla düşük ve yüksek basınçta (90 MPa, 360 MPa, 380 MPa) kesim yapılmıştır. Son olarak da püskürtme memesinin

malzemeye olan uzaklığı değiştirilerek (0,3 cm, 0,5 cm, 0,8 cm, 1 cm, 2 cm, 3 cm, 5 cm, 8 cm) kesim derinliği üzerindeki etkisi incelenmiştir.



Şekil 6.16. Doğal taş örneklerinin aşındırıcı su demetiyle kesimi sırasındaki görüntüler



Şekil 6.17. Aşındırıcı su demetiyle kesme deneyleri yapılan doğal taş örneklerinin bir kısmı

Kesme derinliği 5 cm üzerinde olan tuf, Küfeki taşı gibi doğal taşlar için kesme deneyleri kalınlığı daha fazla olan (10 cm, 15 cm, 20 cm) numunelerle tekrarlanmıştır. Böylece aşındırıcı su demetinin kayacı kesmeden belirli bir derinliğe ulaşması temin edilmiştir.

7. AŞINDIRICILI SU DEMETİYLE DOĞAL TAŞ KESİMİNDE KESİLEBİLİRLİĞİN BELİRLENMESİ İÇİN KULLANILAN FARKLI ÖLÇÜTLER

Aşındırıcılı su demetiyle kesme işlemi sırasında su demeti malzemeyi kesip altına geçtiğinde, malzemenin üzerinde bulunduğu tezgahın altındaki su dolu tankta enerjisi sönmümlenerek çevreye etkisi kontrol altına alınmaktadır. Su demetinin malzemeyi kesemediği durumlarda ise malzemedede belli bir derinliğe inmekte ve geri ve yanlara yansiyarak çevrede tehlike oluşturmaktadır. Bu durum kesme uygulamalarında sorun yaratmış ve ilk kesme uygulamaları da bu sebeple koparma kesimleri şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Bu uygulamalarda, kesim yüzeyleri incelendiğinde, malzeme türü değiştiğinde veya püskürtme memesi ilerleme hızı, püskürtme memesi çapı ve aşındırıcı besleme miktarı gibi kesme parametrelerinden biri değiştiğinde kesim yüzeylerinin de farklılıklar gösterdiği tespit edilmiş ve bu farklılıkların ortaya konulmasıyla kesilebilirliğin ne şekilde ifade edilebileceği araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kesim yüzeylerindeki izlerin eğimi (düşeyden sapması) ve yüzeylerin pürüzlülüklerinin bu maksatla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

İkinci uygulamalarda ise su demetinin kontrol altına alınmasıyla koparma kesimleri yerine su demetinin belli bir derinliğe kadar malzemeye nüfuz ettiği kesimler yapılmıştır. Bu uygulamalarda püskürtme memesi yanal hızı çok yüksek tutularak su demetinin malzemedede belli bir derinliğe kadar inmesine müsaade edilmiştir.

Malzeme özellikleri ve kesme parametreleri değiştiğinde su demetinin ulaştığı kesme derinliği de değişmektedir.

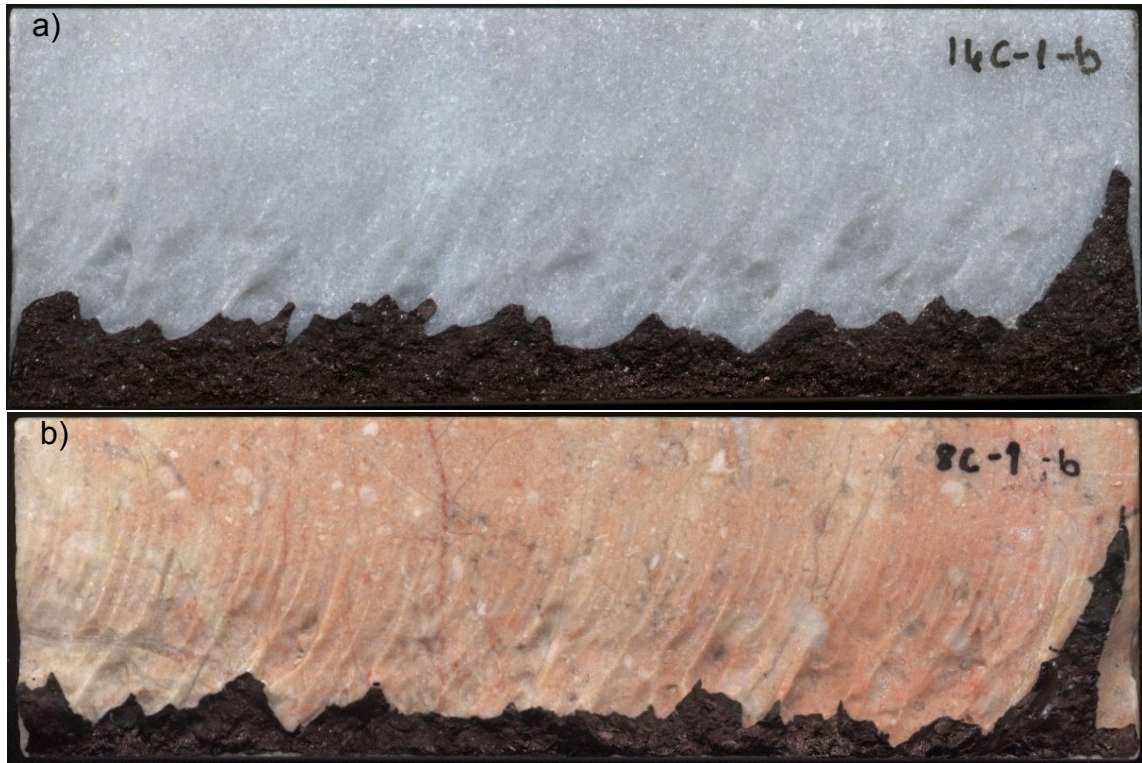
7.1. Kesme Derinliğinin Ölçümü ve Kullanılması

Doğal taşların aşındırıcılı su demeti ile kesilebilirliğinin en temel ölçütü demetin ulaştığı kesme derinliğidir. Doğal taş örneklerinde yapılan kesme uygulamalarında demetin kayada ulaştığı derinliği tespit edebilmek için farklı yöntemler denenmiş fakat kesme yarığının çok dar olmasından dolayı dışarıdan bir aletle ölçmek mümkün olmamıştır. Kesme derinliğini ölçmek için doğal taş örnekleri kesim yapılan yarıktan bir kamayla ayrılarak demetin doğal taş içerisinde nüfuz ettiği derinlik görünür bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra bütün doğal taş

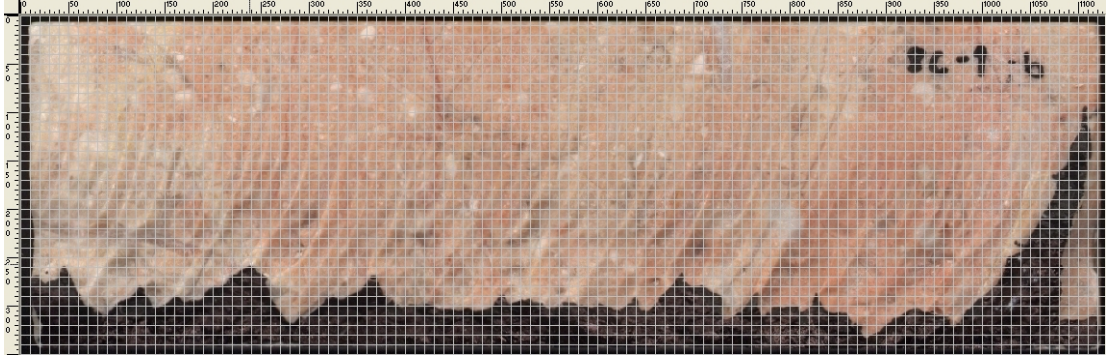
örnekleri için bu yüzeylerde kesme sınırları kalemle çizilip işaretlendikten sonra bir tarayıcı yardımıyla taranmış ve bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan görüntü bir resim işleme programı yardımıyla ölçekli bir zemin üzerine yerleştirilerek derinlik profili eğri şeklinde sayısal hale getirilerek ortalama kesme derinliği hesaplanmıştır.

Kesim yarığında ayrılıp kopan kısmı boyanan iki örnek Şekil 7.1'de verilmektedir. Derinlik ölçümü ise Şekil 7.2'de görüldüğü gibi resim işleme programı ile karelere ayrılmış yüzeyde derinliğin alt sınırını oluşturan eğrinin piklerinin ortalaması alınarak yapılmıştır.

Doğal taş örneklerinin tamamı 800 mm/dk'lık püskürtme memesi ilerleme hızında, 360 MPa pompa basıncında ve 450 g/dk aşındırıcı beslemesinde kesilerek doğal taşların yapısal özelliklerinin kesme derinliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen kesme derinliği değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Aşındırıcılı su demeti ile kesimi yapılan Afyon Gri (a) ve Sivrihisar Bej (b) numunelerinin kesim yüzeylerinin tarayıcıdan elde edilen görüntüsü



Şekil 7.2. Doğal taş kesim yüzeyinin karelere ayrılarak kesme derinliğinin milimetrik ölçümü

Bununla birlikte, pompa basıncı, püskürtme memesi yanal hızı, aşındırıcı besleme miktarı, püskürtme memesi doğal taş arası mesafe gibi kesme parametrelerinin kesme derinliğine etkileri de farklı yapıya sahip doğal taşlar üzerinde yapılan kesimlerle araştırılmıştır.

Bu çalışmalarda, farklı kesme parametrelerini ifade eden kesme koşulları Çizelge 7.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Elde edilen kesme derinliği sonuçları ise Çizelge 7.3’de verilmektedir.

Çizelge 7.1. Doğal taş örneklerinin aşındırıcılı su demeti kesme derinlikleri

Örnek No	Kesme derinliği (mm)	Örnek No	Kesme derinliği (mm)	Örnek No	Kesme derinliği (mm)
1	25,2	17	29,2	34	26,8
2	25,1	18	22,7	35	22,7
3	27,1	19	177,6	36	31,2
4	25,2	20	26,3	37	22,3
5	25,2	21	26,4	38	29,1
6	26,8	22	25,8	39	24,5
7	24,8	23	28,9	40	82,1
8	25,0	24	26,8	41	6,8
9	27,6	25	27,6	42	8,8
10	25,4	26	35,9	43	11,8
11	26,5	27	30,0	44	11,2
12	27,8	28	30,4	45	9,2
13	25,7	29	34,6	46	8,6
14	27,9	30	106,6	47	11,4
15	28,3	32	45,5		
16	28,1	33	26,6		

800 mm/dk'lık püskürtme memesi ilerleme hızında, 360 MPa basınç ve 450 g/dk aşındırıcı beslemesinde kesim yapılmıştır

Kesme deneylerinde doğal taş örnekleri öncelikle aynı koşullarda aşındırıcılı su demetiyle kesilmiş ve oluşan yarıktaki su demetinin ulaştığı maksimum derinlik

hesaplanmıştır. Örnekler içinde su demeti 19 nolu tuf örneğinde en fazla derinliğe ulaşırken en az kesme derinliği 41 nolu diyabaz örneğinde gözlemlenmiştir. Granit, diyabaz vb. sert taş örnekleri; kireçtaşı, kristalin mermer, traverten vb. karbonatlı kayalar ve tuf, küfeki taşı vb. kayaların oluşturduğu üç farklı grup oluşan kesme derinliği bakımından birbirinden oldukça ayrı davranış göstermektedir. Kesme derinlikleri arasında yüksek farklar mevcuttur.

Çizelge 7.2. Farklı kesme koşullarında seçilen parametrelerin türü ve değerleri

Kesme Koşul Numarası	Kesme Parametreleri			
	Püskürtme memesi yanal hızı (mm/dk)	Aşındırıcı besleme miktarı (g/dk)	Pompa basıncı (MPa)	Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe (mm)
1	800	450	360	5
2	1000	450	360	5
3	1200	450	360	5
4	800	375	360	5
5	800	200	360	5
6	800	450	90	5
7	800	450	380	5
8	800	450	360	8
9	800	450	360	3

Çizelge 7.3. Doğal taş örneklerinin farklı kesme koşullarındaki aşındırıcılı su demeti kesme derinlikleri

Örnek No	Kesme Koşulları								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Kesme Derinlikleri (mm)								
12	27,8	23,8	20,6	26,7	25,1	12,6	28,4	-	-
20	26,3	21,7	20,1	24,0	21,4	11,5	26,9	-	-
25	27,6	22,6	20,3	25,9	23,5	12,0	28,3	-	-
27	30,0	26,0	23,0	29,4	26,6	13,6	30,7	-	-
32	45,5	43,0	37,6	44,9	43,9	20,3	46,8	39,2	49,4
34	26,8	24,2	21,6	28,1	24,4	11,8	27,3	23,1	29,2

Farklı kesme koşullarında kesilen doğal taş örnekleri incelendiğinde kesme derinliğinin özellikle aşındırıcılı su demeti püskürtme memesinin yanal hızına karşı oldukça duyarlı olduğu görülmektedir. Kısa mesafelerde püskürtme memesi-doğal taş örneği arası mesafe kesme derinliği üzerinde önemli etkiye sahip olmaktadır.

Burada, yanal hız arttıkça kesme derinliğinin azaldığı (pompa basıncı sabit), pompa basıncı arttıkça (sabit yanal hızda) kesme derinliğinin arttığı görülmektedir. Verimli kesim koşullarının tespit edilmesi için 1, 4, ve 7 numaralı koşulların maliyet açısından değerlendirilmesi önem arz etmektedir. En yüksek kesme derinlikleri bu koşullarda oluşmaktadır.

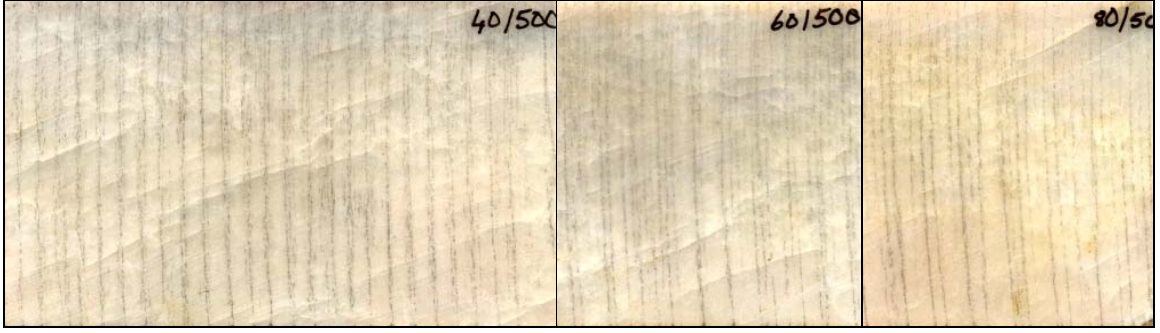
7.2. Kesim İzlerindeki Sapmaların Doğal Taşların Kesilebilirliğinin Belirlenmesinde Kullanılması

Yapılan ilk kesim uygulamalarında püskürtme memesi yanal hızı çok düşük seçilerek doğal taş örneklerinin kesilerek ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra yanal hız artırılarak kesim yüzeylerinde ölçülebilir özellikte belirli bir dalgalı kesim izi oluşacak hız tespit edilmiş ve her bir kalınlık için bu işlem tekrarlanarak tüm doğal taş örneklerinde aşındırıcılı su demetiyle koparma kesim işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bu işlemin yapılmasındaki temel amaç, doğal taş yüzeylerinde oluşan kesim izlerindeki sapmaların, örneklerin kesilebilirliğinin bir göstergesi olduğunu ifade edebilmektir. Malzeme kesimi zorlaştıkça, kesim yüzeyi daha pürüzlü ve kesim izleri daha belirgin hale gelmekte su demeti doğal taş içerisine girdikten sonra doğrusallığını kaybetmekte ve belirli bir sapma yaparak malzemeyi terk etmektedir.

Öncelikle her doğal taş türünden 5 cm'lik örnekler hazırlanarak bu örneklerin bir kısmı 40 mm/dk, 60 mm/dk, 80 mm/dk, 100 mm/dk, 120 mm/dk, 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızlarında kesilmişlerdir.

Bu örneklerin yüzeyleri incelendiğinde özellikle 100 mm/dk hızın altında yüzeylerdeki kesim izlerinde önemli bir sapma olmadığı gözlenmiştir (Şekil 7.3).



Şekil 7.3. 1 nolu doğal taş örneği yüzeyindeki su demeti kesim izleri

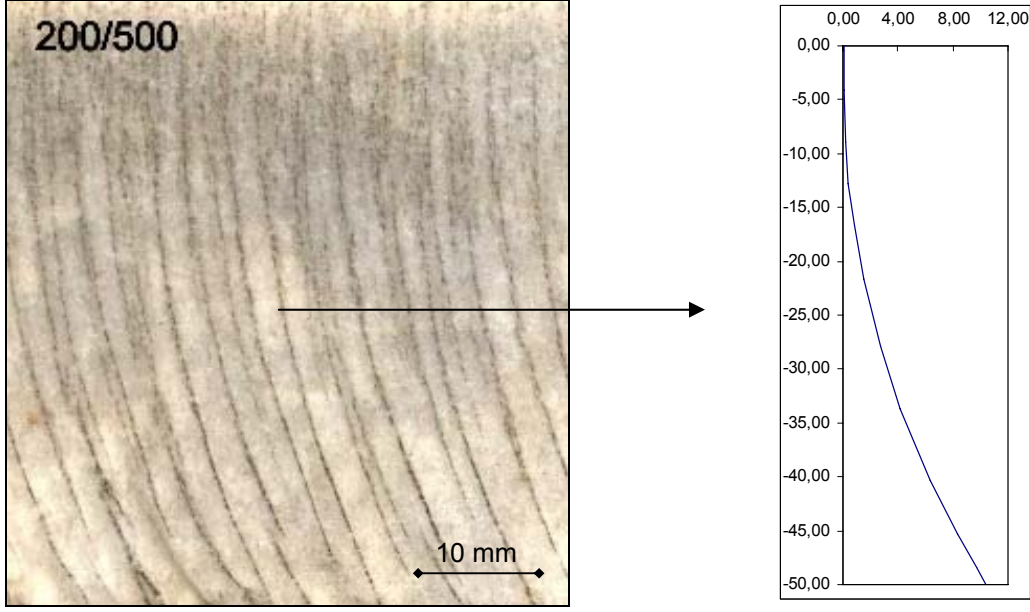
Daha sonra tüm doğal taş örnekleri 100 mm/dk, 120 mm/dk, 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızlarında kesilmişlerdir. Ayrıca, püskürtme memesi yanal hızı sabit tutularak 500 g/dk, 620 g/dk, 720 g/dk'lık aşındırıcı besleme miktarlarında kesim uygulamaları da gerçekleştirilmiştir.

Doğal taş örneklerinden farklı özelliklere sahip olanlardan bir kısmı ayrılarak (2, 3, 8, 12, 16, 17 nolu örnekler) bunlardan 2 cm, 5 cm, 10 cm, 12 cm ve 16 cm kalınlığında aşındırıcılı su demeti kesim örnekleri hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler üzerinde yine farklı püskürtme memesi yanal hızlarında (15 mm/dk, 25 mm/dk, 35 mm/dk, 40 mm/dk, 60 mm/dk, 80 mm/dk, 100 mm/dk, 120 mm/dk, 200 mm/dk 500 mm/dk, 700 mm/dk) kesim uygulamaları yapılmıştır.

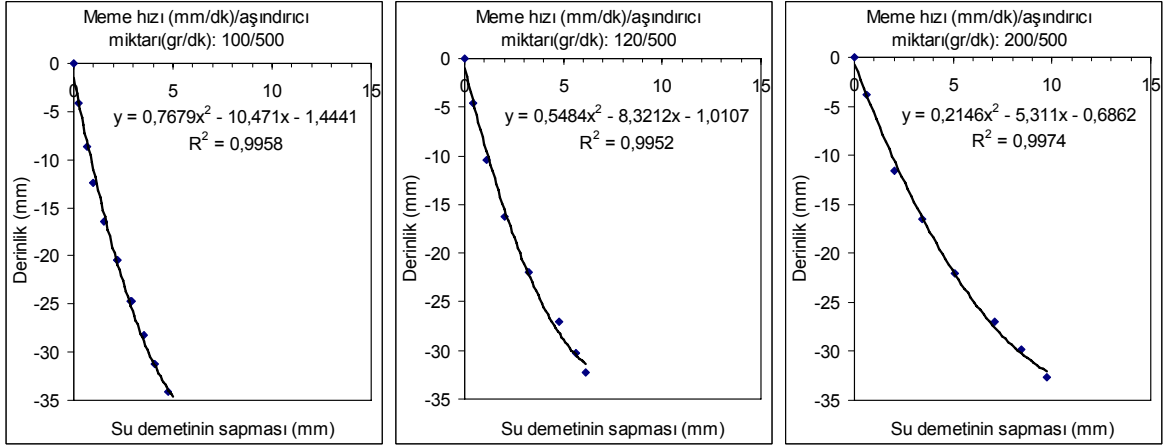
Yapılan kesim uygulamaları sonunda kesim yüzeylerinin karakterizasyonu aşamasına geçilmiştir. Bu aşamada her bir kesim yüzeyi üzerindeki izler karbon kağıdı sürülerek daha da belirginleştirildikten sonra bir tarayıcı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Resim işleme programı vasıtasıyla su demetinin izlediği yolu oluşturan noktalar aynı ölçekle x-y koordinat düzlemine geçirilmiştir (Şekil 7.4). Bu noktaları birleştirecek en iyi eğrinin denklemi ikinci dereceden polinom olmaktadır (Şekil 7.4'deki örnek için: $y = 0,235x^2 - 5,6498x - 1,4069$ $R^2 = 0,9951$).

Şekil 7.5'de püskürtme memesi yanal hızının değiştirilmesiyle demetin 1 nolu doğal taş örneği içindeki sapmasının nasıl değiştiği koordinat düzlemi üzerinde gösterilmektedir.

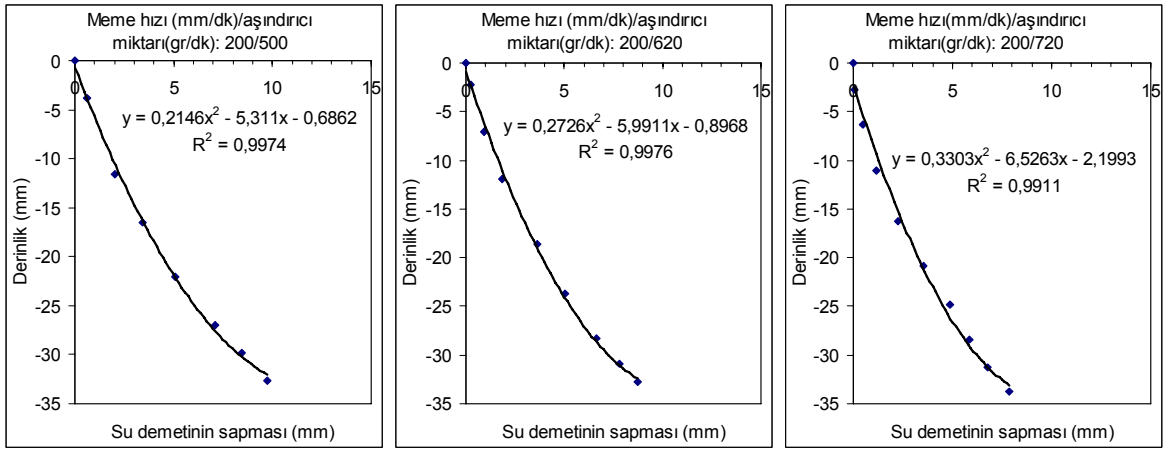


Şekil 7.4. 12 nolu doğal taş örneği yüzeyindeki su demeti kesim izleri ve koordinat eksenine aktarılması (200 mm/dk püskürtme memesi hızı, 500 g/dk aşındırıcı besleme miktarında)



Şekil 7.5. Değişik püskürtme memesi yanal hızlarında oluşan su demeti eğrisi ve eğri denkleminde değişimler

Grafiklerden elde edilen eğriler ve bu eğrilerin denklemleri incelendiğinde püskürtme memesi yanal hızının artışıyla birlikte, denklemlerde x^2 değişkeninin çarpım katsayısı olan eğrilik katsayısının azaldığı yani su demetinin izindeki bükülmenin arttığı ve dolayısıyla demetteki sapmanın arttığı görülmektedir. Şekil 7.6'da ise aşındırıcı besleme miktarındaki değişime karşı su demetinin doğal taş içindeki sapmasının nasıl değiştiği koordinat düzlemi üzerinde gösterilmektedir.



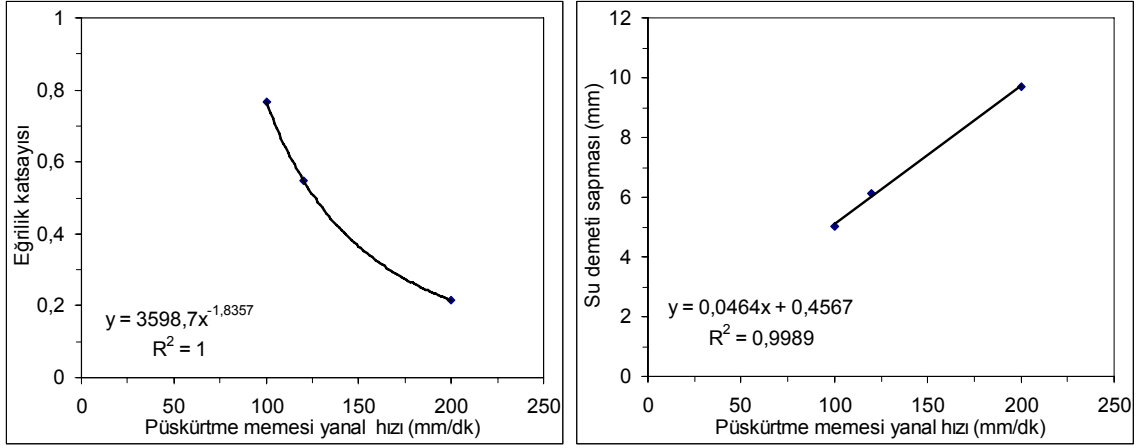
Şekil 7.6. Aşındırıcı besleme miktarının değiştirilmesiyle aşındırıcılı su demetinin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim

Aşındırıcı besleme miktarı artırıldığında ise demetin sapmasında azalma ve denklemlerin eğrilik katsayısında ise bir artış görülmektedir. Bu değişimler Çizelge 7.4'de verilmektedir.

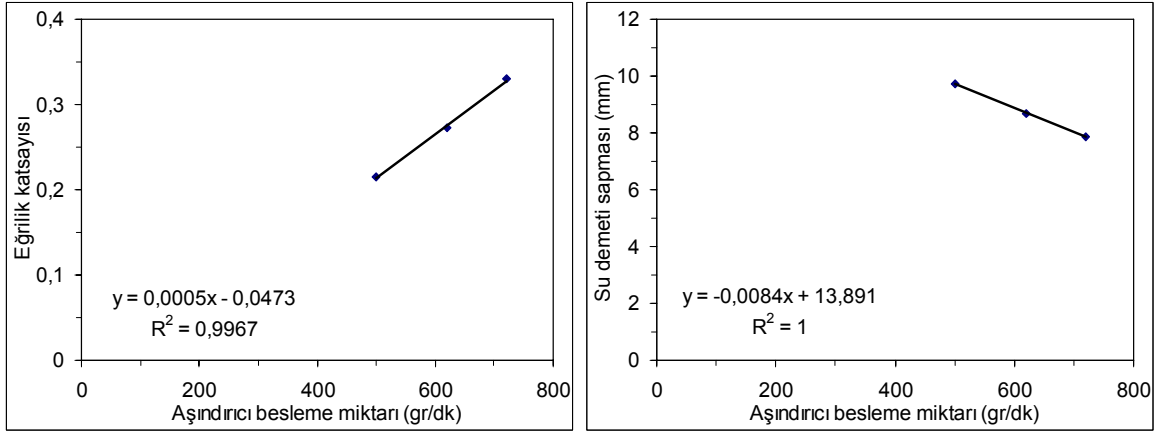
Denklemlerdeki eğrilik katsayısındaki ve demetin sapmasındaki değişimler 1 nolu örnek için grafik olarak Şekil 7.7 ve Şekil 7.8'de verilmektedir.

Çizelge 7.4. Aşındırıcılı su demetiyle kesimde ilerleme hızı ve aşındırıcı miktarının eğrilik katsayısına ve aşındırıcı su demeti sapmasına etkisi

<i>Püskürtme memesi yanal hızı (mm/dk)</i>	<i>Eğrilik katsayısı</i>	<i>Aşındırıcılı su demeti sapması (mm)</i>
100	0,768	5,02
120	0,548	6,11
200	0,215	9,71
<i>Aşındırıcı miktarı g/dk</i>	<i>Eğrilik katsayısı</i>	<i>Aşındırıcılı su demeti sapması (mm)</i>
500	0,215	9,71
620	0,272	8,70
700	0,330	7,87



Şekil 7.7. Püskürtme memesi yanal hızının değiştirilmesiyle demetin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim (1 nolu örnek için)



Şekil 7.8. Aşındırıcı besleme miktarının değiştirilmesiyle demetin sapmasında ve oluşan eğri denklemindeki değişim (1 nolu örnek için)

Bu çalışma, doğal taş örneklerinin büyük bir kısmı için yapılmış ve her bir örneğin farklı aşındırıcı besleme miktarları ve püskürtme memesi yanal hızlarında kesildiği durumlar için demetin malzeme içindeki sapması mm cinsinden tespit edilmiştir. Püskürtme memesi yanal hızının ve aşındırıcı besleme miktarının artmasıyla demetin sapmasında meydana gelen değişim diğer örneklerde de Şekil 6.25 ve Şekil 6.26'dakine büyük ölçüde benzerlik göstermektedir.

5 cm kalınlığındaki örneklerin 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızında ve 500 g/dk aşındırıcı besleme miktarında kesildiği durumda demetin düşeyden sapma miktarları mm cinsinden Çizelge 7.5'de verilmektedir.

Bu değerler incelendiğinde, doğal taş kesimi zorlaştıkça su demetindeki sapmanın arttığı görülmektedir.

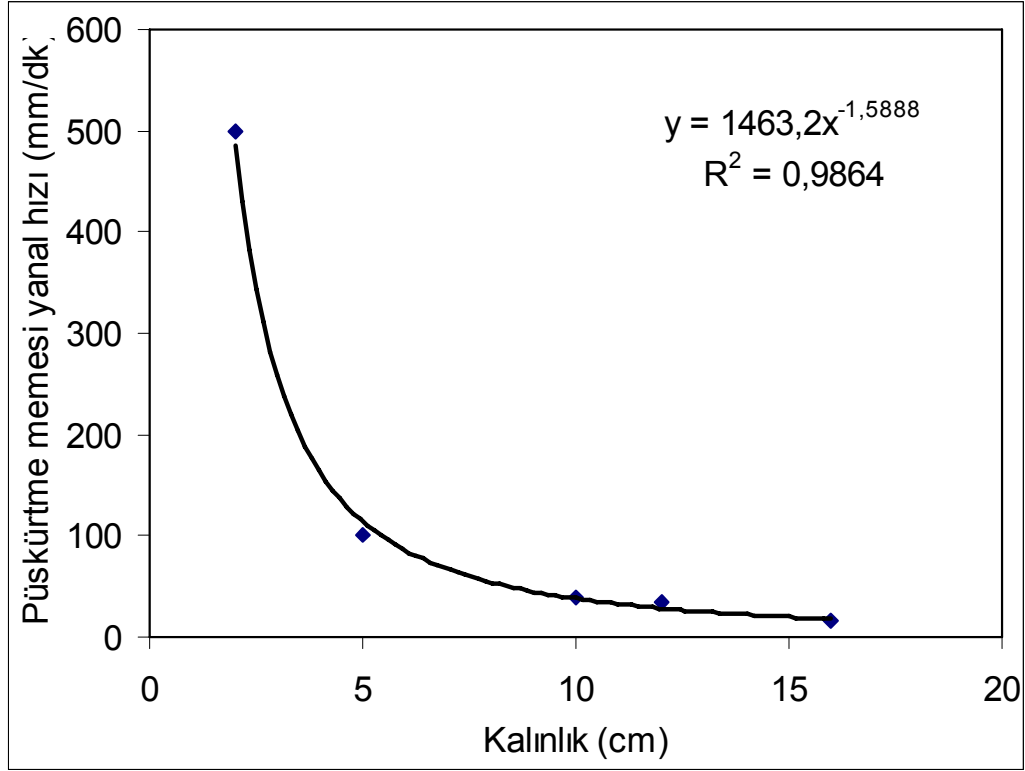
Çizelge 7.5. Doğal taş örneklerinde su demetinin kesim sırasındaki sapma miktarları

Örnek No	Sapma (mm)	Örnek No	Sapma (mm)	Örnek No	Sapma (mm)
1	10,97	14	7,61	27	7,97
2	10,42	15	7,16	28	6,63
3	9,89	16	7,61	29	6,55
4	10,65	17	9,85	30	2,54
5	9,81	18	8,16	32	4,17
6	10,56	20	11,73	33	9,48
7	11,43	21	8,83	34	8,14
8	11,09	22	8,23	35	10,22
9	9,31	23	9,74	36	5,82
10	10,73	24	8,93	37	10,15
11	10,27	25	10,47	38	8,83
12	10,17	26	7,57	39	8,98
13	11,81				

Bu bölümde yapılan çalışmalar, 2 cm, 10 cm, 12 cm ve 16 cm kalınlığındaki farklı doğal taş örneklerinde (2, 3, 8, 12, 16, 17 nolu örnekler) de tekrarlanmıştır. Aşındırıcı besleme miktarının belirli bir değerin üzerinde olduğu sürece kesme işlemini çok fazla etkilemediği, kesme işleminde asıl etkili parametrenin püskürtme memesi yanal hızı olduğu tespit edilmiştir.

Örnekler aşındırıcı besleme miktarı 400g/dk olacak şekilde farklı püskürtme memesi yanal hızlarında kesilmiştir. Artan püskürtme memesi yanal hızlarına karşılık doğal taş yüzeylerinde oluşan izler incelenerek oluşan demet sapmaları kaydedilmiştir. Bu şekilde doğal taş örneklerinin her bir kalınlık değeri için aynı sapmayı veren, diğer bir deyişle aynı kesim yüzey kalitesine sahip, püskürtme memesi yanal hızı tespit edilmiştir.

12 nolu doğal taş örneği için kalınlığa karşılık püskürtme memesi yanal hızı grafiği Şekil 7.9'da verilmiştir. Püskürtme memesi yanal hızının artışı ile aynı kalitede kesilebilecek doğal taş kalınlığı üssel olarak azalmaktadır.

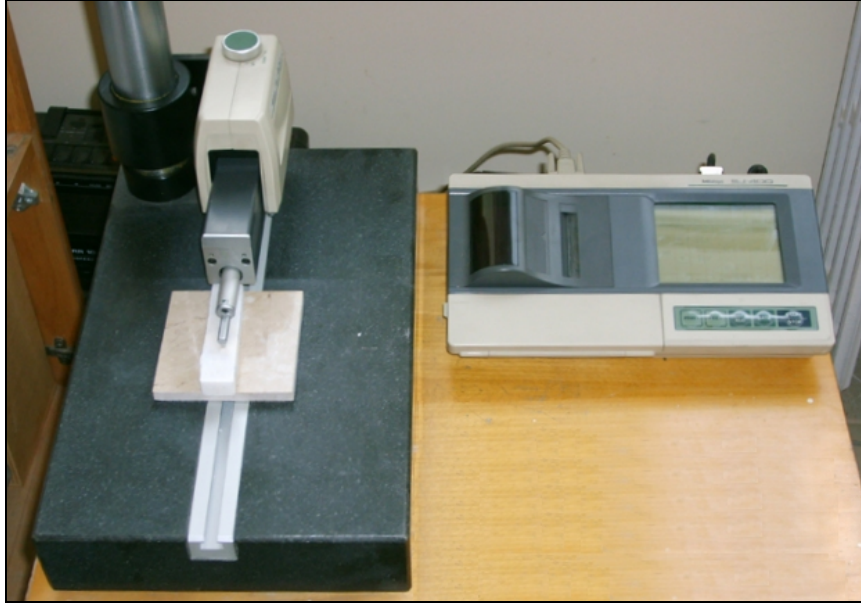


Şekil 7.9. 12 nolu doğal taş örneği için artan kalınlığa karşılık püskürtme memesi yanal hızı grafiği

7.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Doğal Taşların Kesilebilirliğinin Belirlenmesinde Kullanılması

Doğal taş örnekleri su demetiyle kesilirken püskürtme memesi yanal hızının, aşındırıcı miktarının değiştirilmesi ile elde edilecek kesim yüzeylerinde su demetinin sapması değiştiği gibi demetin yüzeyde oluşturduğu girinti-çıkıntı ve pürüzlülük de değişmektedir. Bu çalışmada, kesim yüzeylerindeki pürüzlülük değerlerinin doğal taşların su demeti ile kesilebilirliğinin tespitinde bir veri olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

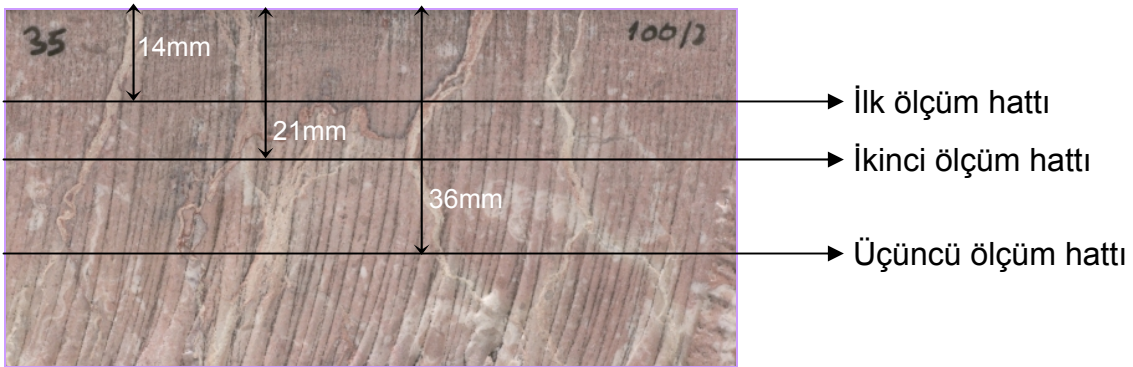
Bu amaçla doğal taş örneklerinin önemli bir kısmı (1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 26, 27, 35, 36, 38) seçilerek kesim yüzeylerinde Mitutoyo firmasının SurfTest SJ-401 modeli iğne tipli pürüzlülük ölçer ile pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır (Şekil 7.10).



Şekil 7.10. SurfTest SJ-401 modeli iğne tipli pürüzlülük ölçer

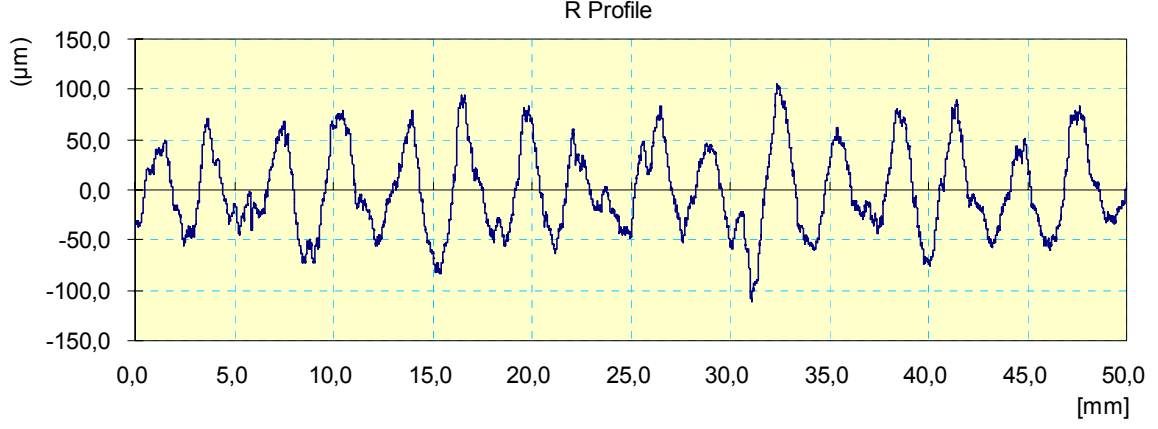
Demetin doğal taş örneğine girdiği noktadan itibaren derinliği arttıkça demetteki sapma miktarı ve yüzeyde oluşan pürüzlülük değeri artmaktadır. Bu sebeple doğal taş örneğinin yüzeyindeki düşey her konum için ölçülecek pürüzlülük değeri de farklı olacaktır.

Doğal taş örneklerinde öncelikle kesim yüzeyi üzerinde düşey olarak ölçüm hatları oluşturularak her bir derinlik için ortalama pürüzlülük değeri (R_a) ölçümleri yapılmıştır (Şekil 7.11).

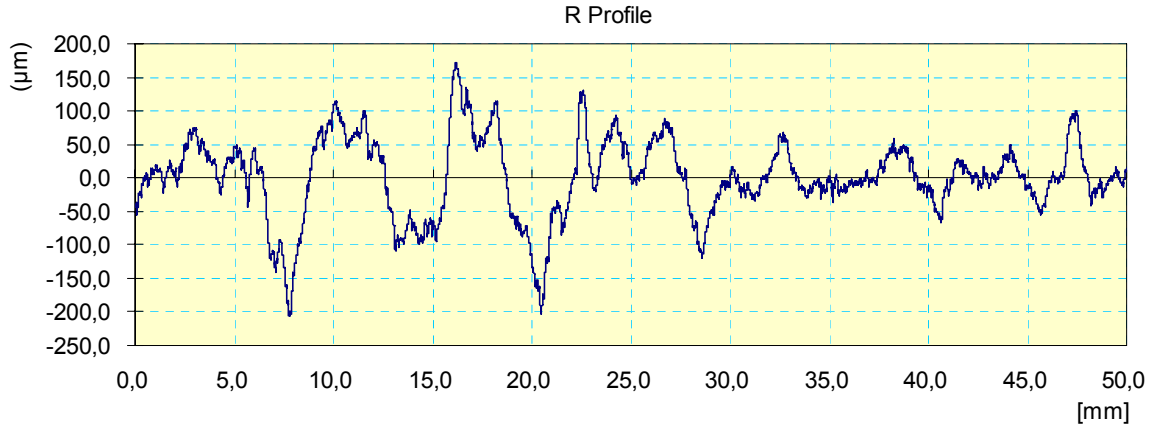


Şekil 7.11. Doğal taş örneklerinde pürüzlülük ölçüm hatlarının konumu

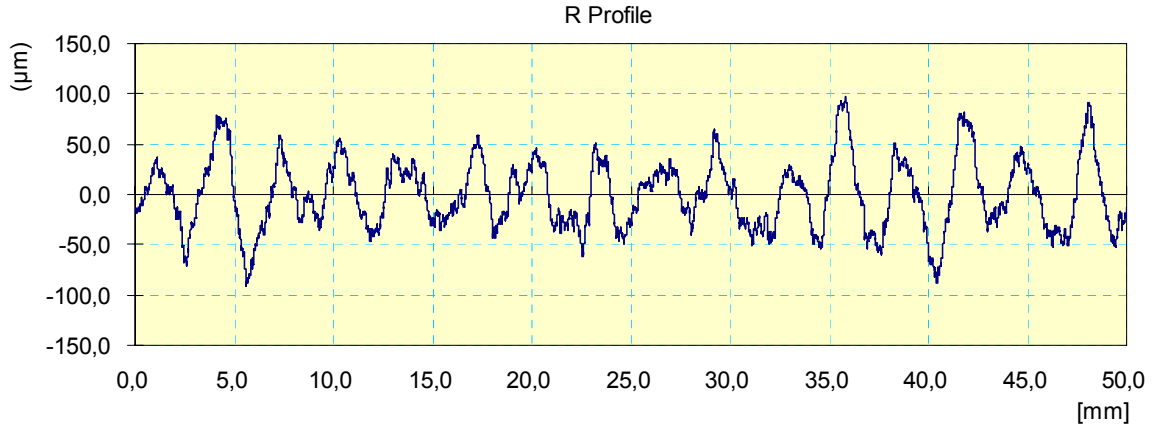
Şekil 7.12, Şekil 7.13, Şekil 7.14'de 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızında ve 500 g/dk aşındırıcı beslemesinde kesilen farklı doğal taş örnekleri için ikinci ölçüm hattında yapılan pürüzlülük ölçümü sonucu elde edilen yüzey profiline örnekler verilmektedir.



Şekil 7.12. 7 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili



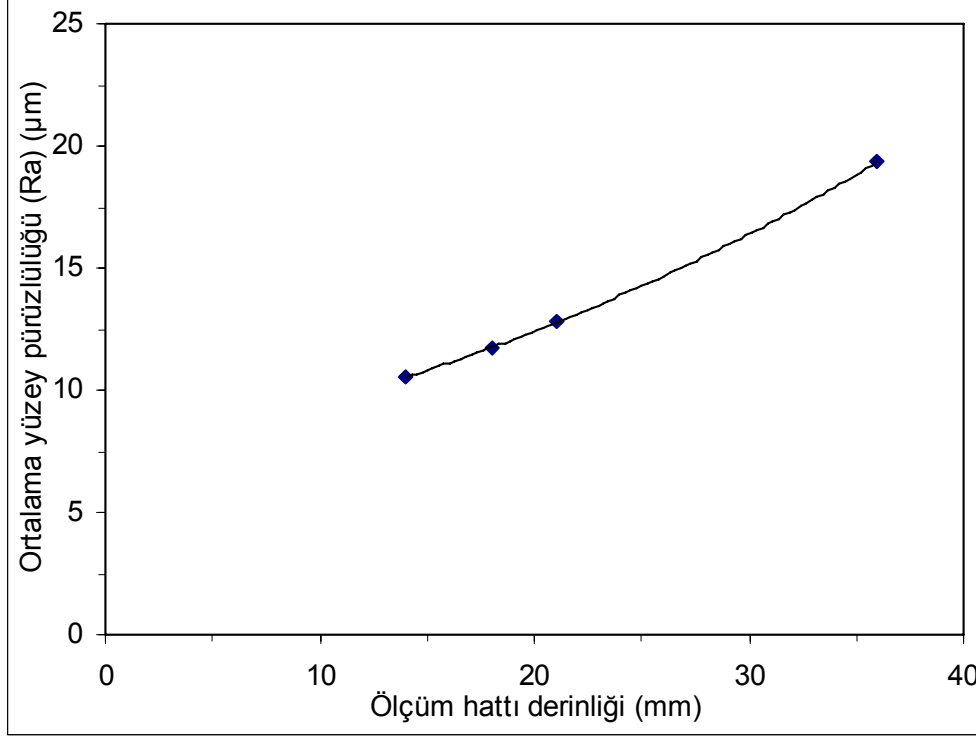
Şekil 7.13. 15 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili



Şekil 7.14. 6 numaralı doğal taş örneğinin pürüzlülük profili

Pürüzlülük profilleri incelendiğinde kayaç türüne göre yüzeyde oluşan pürüzlülüğün birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılık doğal taşların kesmeye karşı gösterdikleri dirençle yakından ilgilidir. Kesimi göreceli olarak zor olan kayalarda yüzey pürüzlülüğü daha yüksek değerler almaktadır.

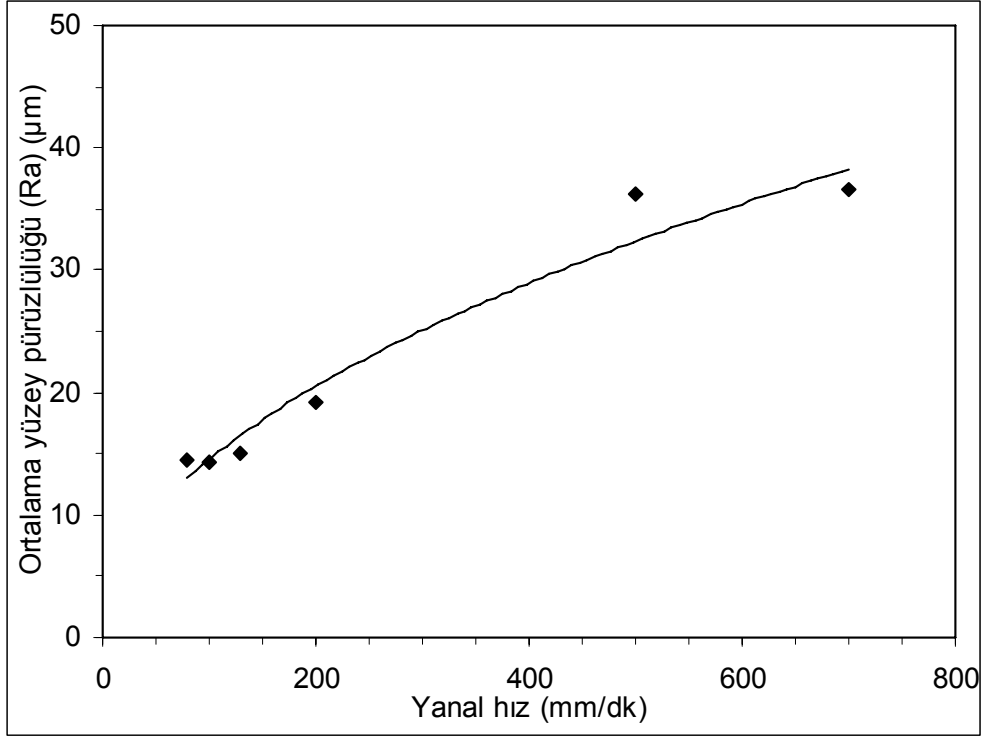
Pürüzlülük ölçümleri sonucunda ölçüm hattının derinliğindeki artışla birlikte pürüzlülükteki artma miktarının farklı doğal taş örnekleri için birbirine çok yakın olduğu ortaya çıkmıştır. 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızında ve 500 g/dk aşındırıcı beslemesinde kesilen 14 nolu doğal taş örneği için derinlikle bu derinlikte ölçülen ortalama pürüzlülük değeri arasındaki ilişki Şekil 7.15’de verilmektedir.



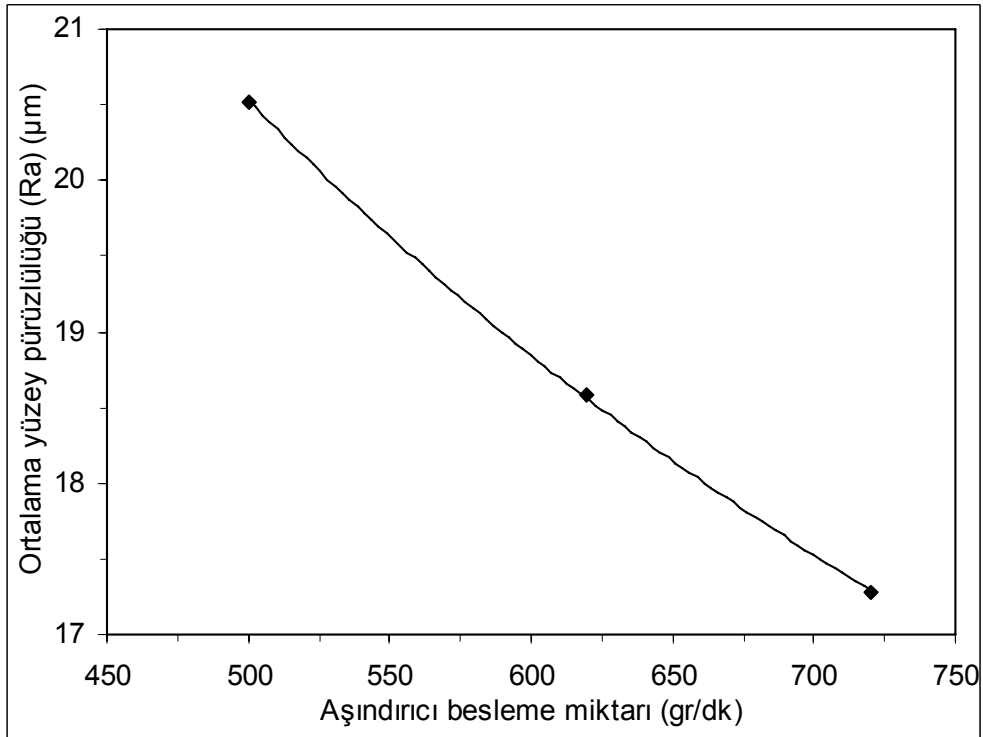
Şekil 7.15. Ölçüm hatlarının derinliğine (kesme derinliğine) karşılık bu hatlarda ölçülen ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki

Yanal hızın artışıyla yüzey pürüzlülüğündeki değişim ise 500 g/dk aşındırıcı besleme miktarında farklı yanal hızlarda kesilen 32 numaralı doğal taş örnekleri için ikinci ölçüm hattında ölçüm yapılarak Şekil 7.16’da verilmektedir.

Aşındırıcı besleme miktarının artışıyla ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim ise 200 mm/dk yanal hızında farklı aşındırıcı besleme miktarlarında kesilen 14 numaralı doğal taş örnekleri için ikinci ölçüm hattında ölçüm yapılarak bir grafikte Şekil 7.17’de verilmektedir.



Şekil 7.16. Artan püskürtme memesi yanal hızına karşılık ölçülen ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki



Şekil 7.17. Aşındırıcı besleme miktarına karşılık ortalama pürüzlülük değeri (Ra) arasındaki ilişki (püskürtme memesi yanal hızı 200 mm/dk olarak seçilmiştir)

Doğal taş örneklerinin 200 mm/dk püskürtme memesi yanal hızında ve 500 g/dk aşındırıcı besleme miktarında kesildiği durumdaki ortalama yüzey pürüzlülükleri ikinci ölçüm hattında ölçüm yapılarak belirlenmiştir. Sonuçlar Çizelge 7.6'da verilmektedir.

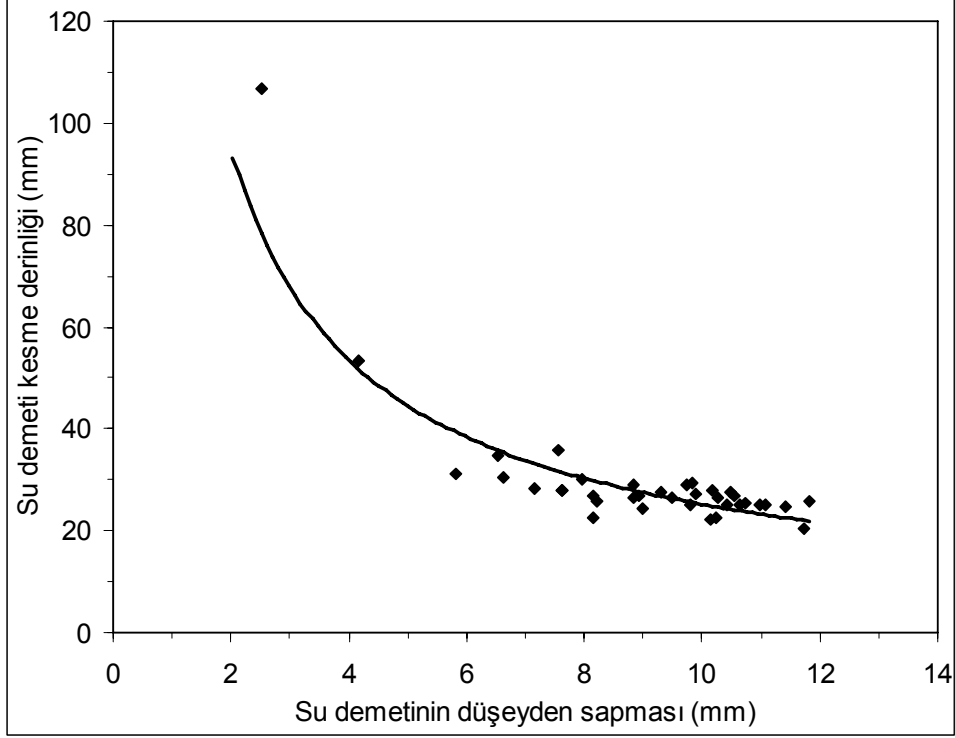
Çizelge 7.6. Doğal taş örneklerinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) (μm)

Örnek No	Ortalama pürüzlülük (Ra) (μm)	Örnek No	Ortalama pürüzlülük (Ra) (μm)	Örnek No	Ortalama pürüzlülük (Ra) (μm)
1	26,62	11	23,47	23	14,98
2	23,34	12	19,32	24	41,17
4	31,34	13	26,62	26	12,48
6	28,46	14	21,95	27	18,06
7	35,79	15	23,80	35	52,98
8	49,24	16	28,34	36	19,24
9	26,48	17	28,29	38	21,72
10	51,37	22	19,24		

7.4. Doğal Taşların Aşındırıcılı Su Demetiyle Kesilebilirliğinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Farklı Ölçütlerin Karşılaştırılması

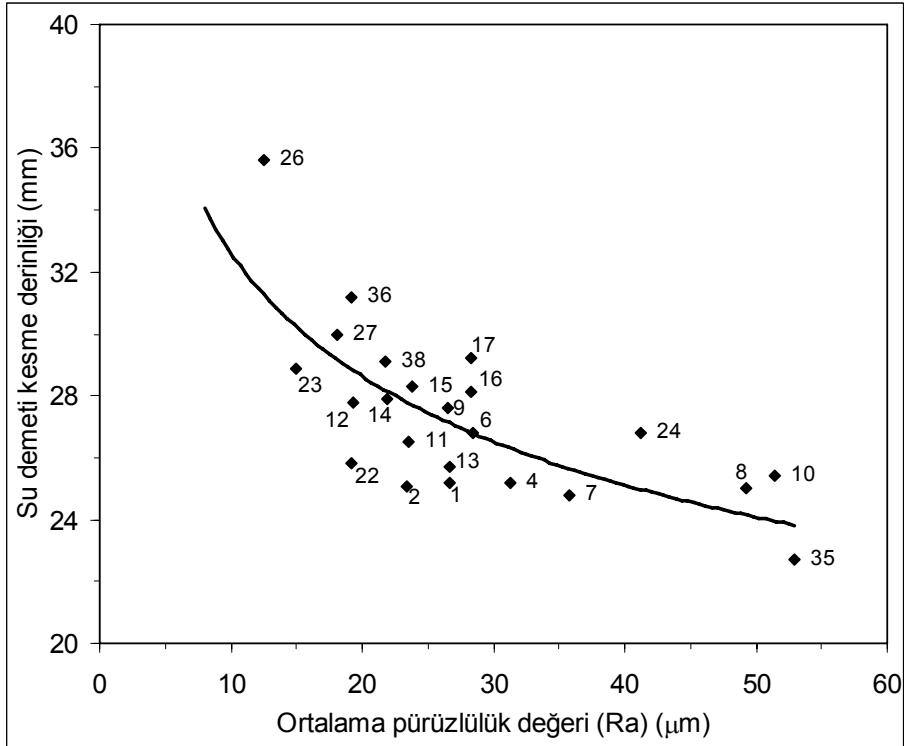
Su demetiyle doğal taş kesme deneylerinde; demetin malzeme içerisine nüfuz ettiği derinlik kesilebilirliğin temel ölçütü olarak kabul edilmektedir. Fakat bununla birlikte, koparma kesimleri yapıldığı durumlarda demetin malzeme içerisindeki sapma miktarı veya kesim yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülükleri de kesilebilirliğin bir ölçüsü olduğu bu çalışmada ortaya konulmuştur. Bu veriler kullanılarak aşındırıcılı su demetinin belirli bir püskürtme memesi yanal hızında ulaşabileceği derinlik kestirilebilecektir.

Doğal taş örneklerinde 800 mm/dk'lık püskürtme memesi yanal hızında yapılan kesme uygulamalarından elde edilen kesme derinliği değerleriyle 200 mm/dk'lık koparma kesimlerinde elde edilen demetin sapma miktarı değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.18'de verilmektedir.



Şekil 7.18. Aşındırıcılı su demetinin düşeyden sapması-su demeti kesme derinliği ilişkisi

Kesme derinliği değerleriyle 200 mm/dk'lık koparma kesimlerinde yüzeylerde ölçülen ortalama pürüzlülük değerleri arasındaki ilişki Şekil 7.19'da verilmektedir.



Şekil 7.19. Ortalama yüzey pürüzlülüğü-su demeti kesme derinliği ilişkisi

Şekil 7.18 ve Şekil 7.19'da görüldüğü gibi doğal taş kesim yüzeylerindeki ortalama pürüzlülük değeri ve özellikle demetin düşeyden sapma miktarı kesme derinliğinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri ile kesme derinliği arasındaki ilişki bir miktar düşük korelasyon katsayısı göstermiştir. Bunun sebebi ölçülen mikro pürüzlülük değerlerinin su demeti içerisindeki aşındırıcı tanelerin kesme izlerinden etkilenmesidir. Su demetinin yüzeyde oluşturduğu girinti-çukurluk ve dalgalanmaları en iyi ifade eden 'yüzey dalgalılığı' katsayısının da kullanılmasıyla bu durum önlenilebilir.

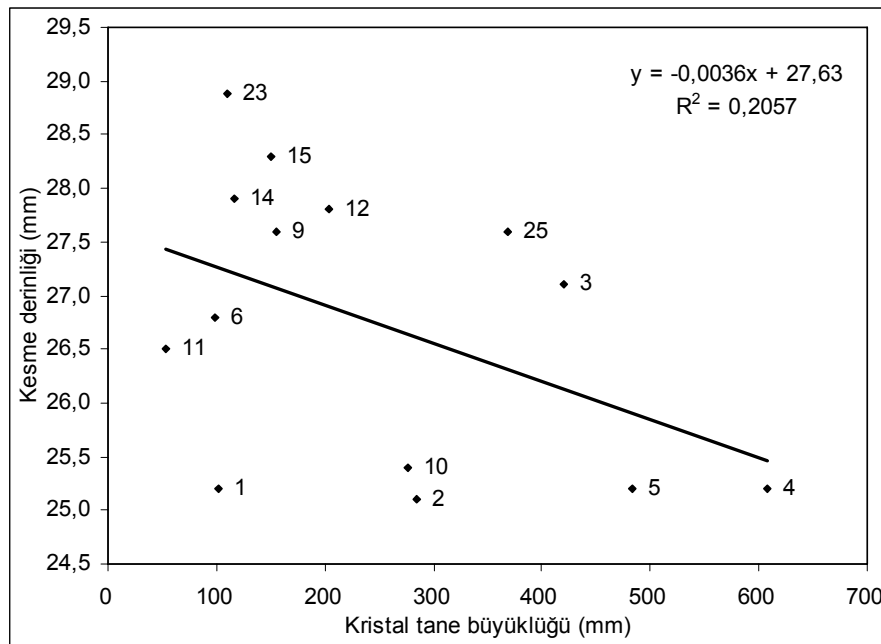
8. MAKİNE KESME PARAMETRELERİ ve DOĞAL TAŞ ÖZELLİKLERİ İLE AŞINDIRICILI SU DEMETİ KESME DERİNLİĞİ ARASINDAKİ İLİŞKİLER

Çalışmanın bu bölümünde doğal taşların çeşitli yapısal özellikleri ile birlikte makine kesme parametrelerinin aşındırıcılı su demeti kesme derinliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

8.1. Doğal Taş Özellikleri – Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Derinliği Arasındaki İlişkiler

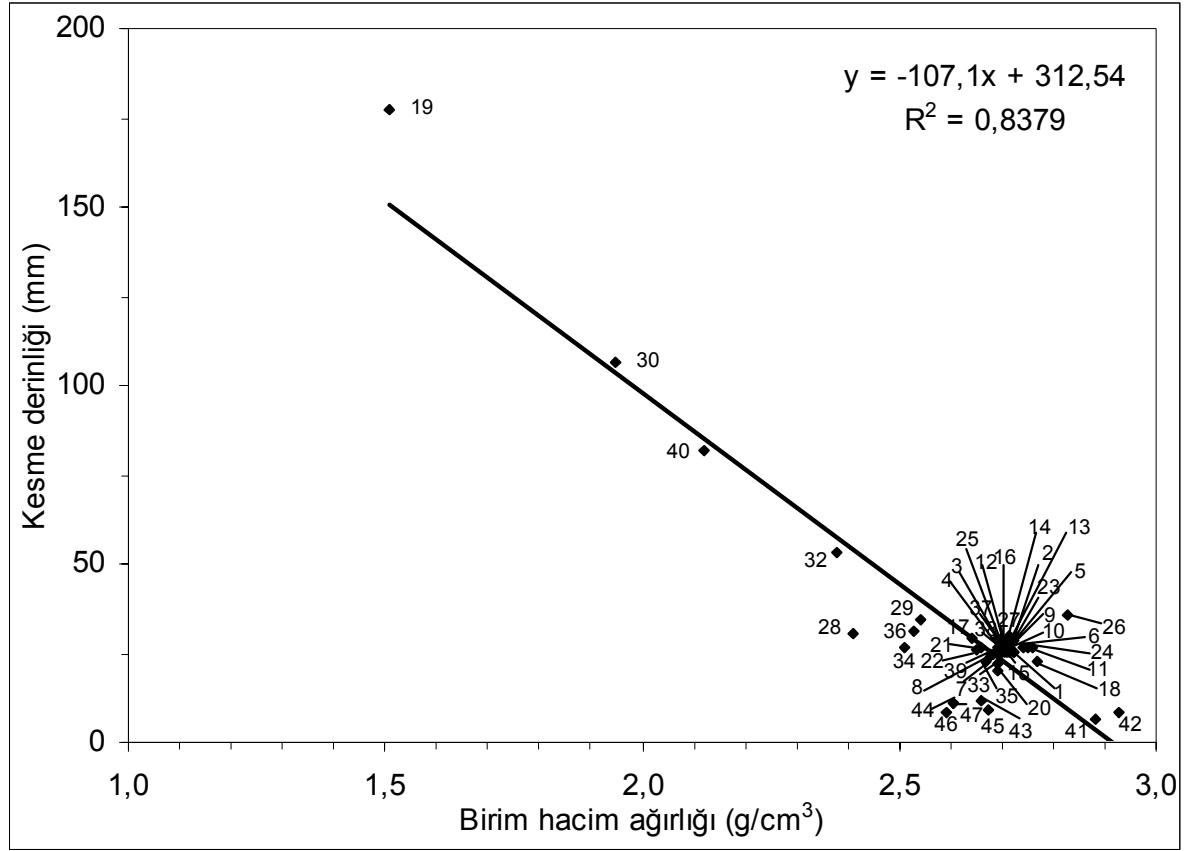
Bu bölümde, doğal taşların kristal tane boyu gibi petrografik özellikleri; sertliği, birim hacim ağırlığı, su emme miktarı, görünür gözenekliliği, aşınma dayanımı gibi fiziksel özellikleri ile tek eksenli basma dayanımı, elastisite modülü, gibi mekanik özellikleri ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Rekristalize kalsiyum karbonattan oluşan gerçek mermerlerin kristal tane boyu ile kesme derinlikleri arasındaki ilişki araştırılmış ve Şekil 8.1'de grafik olarak verilmiştir. Kesme derinliği ile bir ilişki vermemekle beraber 11, 6, 9, 12 nolu örneklerde bir ilişki olasılığı bulunmaktadır. Burada detay mineralojik analizlere gereksinim olup, deney örneklerini temsil eden yüksek miktarda ince kesitlere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada olanaksızlıklar nedeniyle bu gerçekleştirilememiştir.



Şekil 8.1. Kristal tane boyu ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

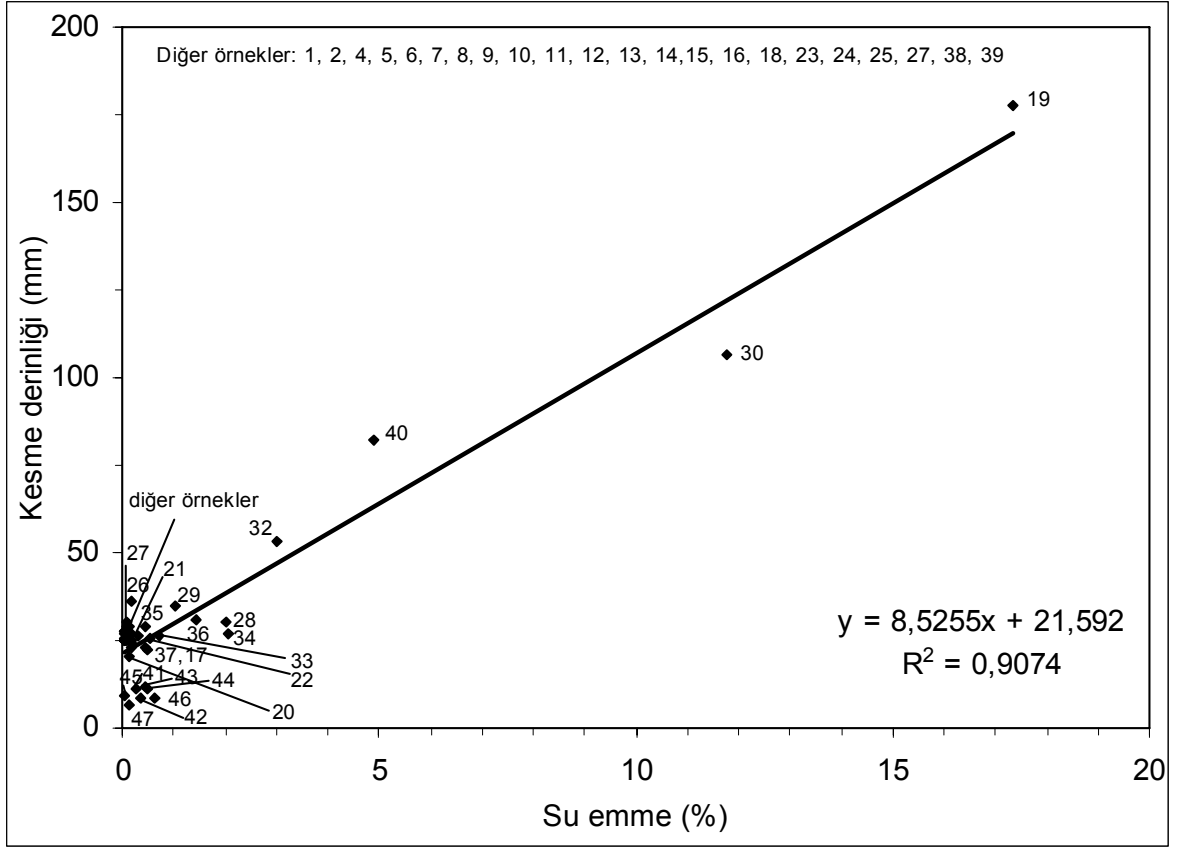
Doğal taş örneklerinin birim hacim ağırlığı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki ise Şekil 8.2'de verilmektedir.



Şekil 8.2. Doğal taş örneklerinin birim hacim ağırlığı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Birim hacim ağırlığı ile kesme derinliği arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır. Doğal taşların birim hacim ağırlığı arttıkça aşındırıcılı su demeti kesme derinliği doğrusal olarak azalmaktadır.

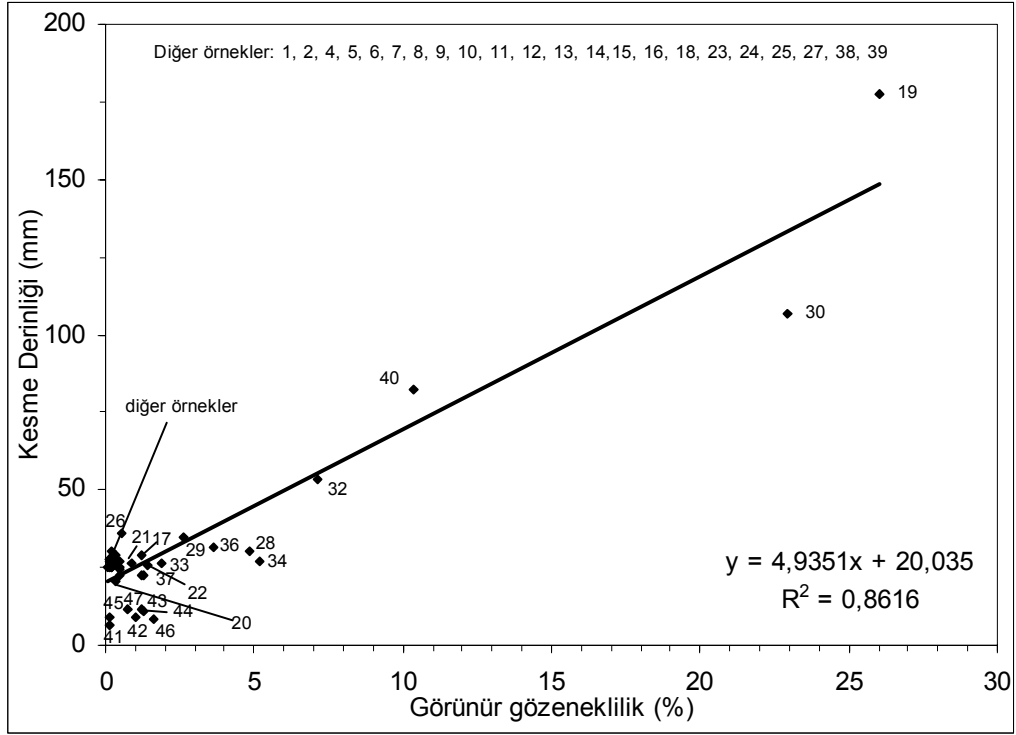
Doğal taş örneklerinin su emme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.3'de verilmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi su emme miktarı arttıkça doğal taş örneklerinde oluşan kesme derinliği de doğrusal olarak artmaktadır. Ayrıca mermer, kireçtaşı, granit vb doğal taş örnekleri ayrı ayrı gruplar şeklinde grafikte yer almaktadır.



Şekil 8.3. Doğal taş örneklerinin su emme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

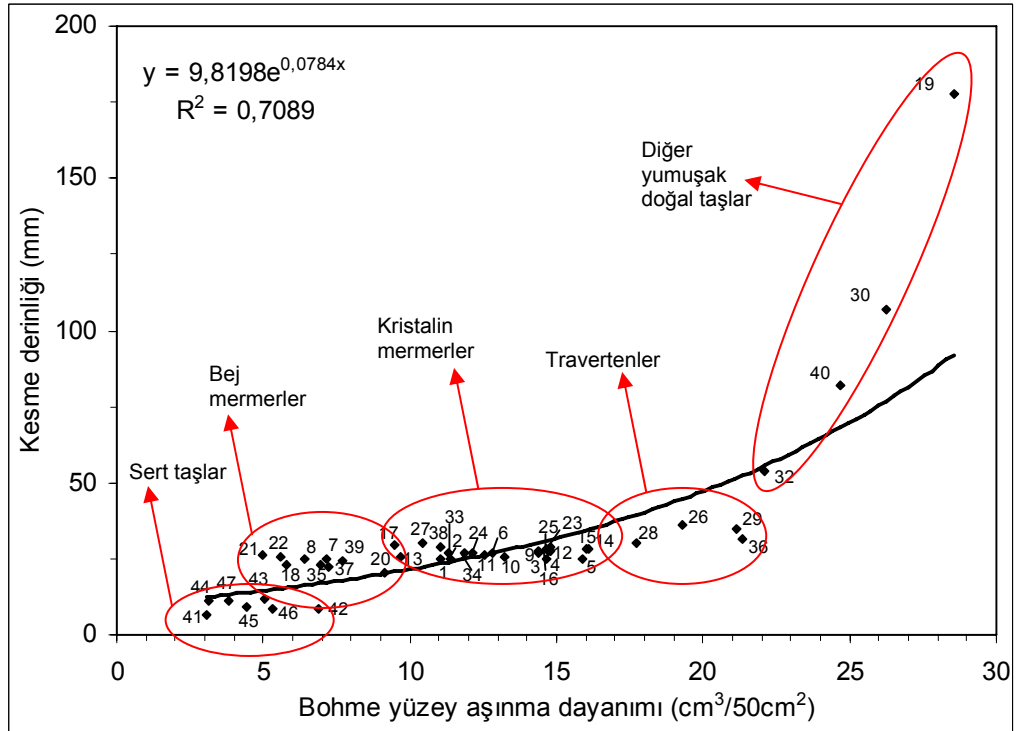
Doğal taş örneklerinin görünür gözenekliliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.4'de verilmektedir. Aşındırıcılı su demeti kesme derinliği ile örneklerin görünür gözenekliliği arasında anlamlı bir ilişki bulunmaktadır.

Görünür gözeneklilik arttıkça kesme derinliği de doğrusal olarak artmaktadır. Gözeneklilik arttıkça birim hacimde kesilen katı madde miktarı azalacağından böyle bir ilişkinin oluşması beklenmektedir.



Şekil 8.4. Doğal taş örneklerinin görünür gözenekliliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Doğal taş örneklerinin Böhme yüzey aşınma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.5'de verilmektedir.

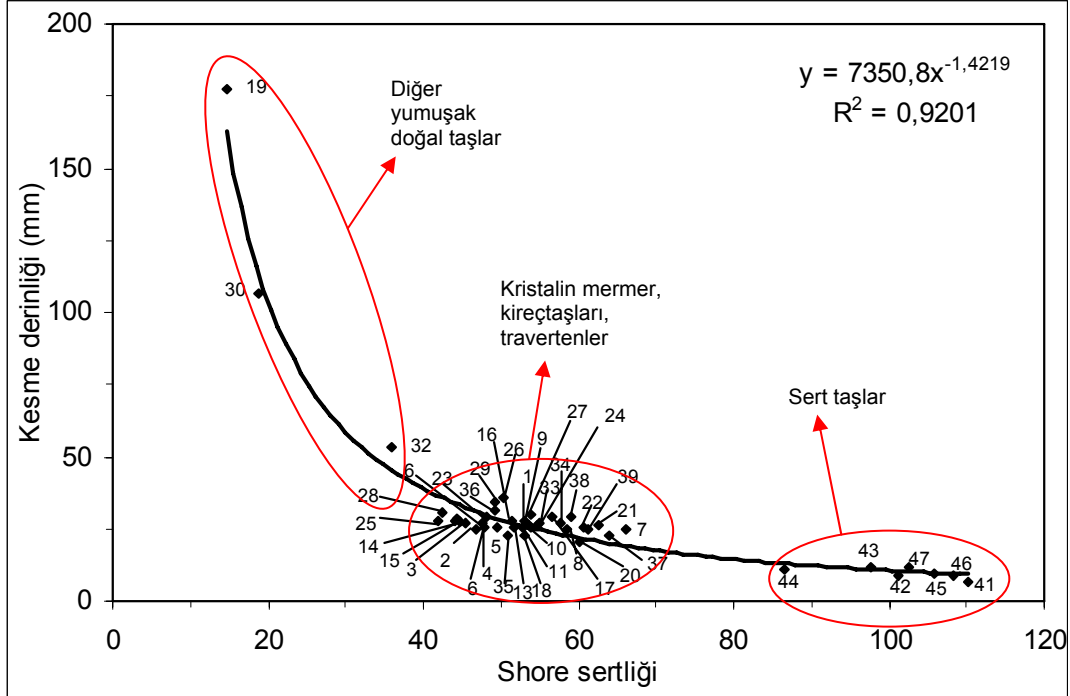


Şekil 8.5. Doğal taş örneklerinin Böhme yüzey aşınma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

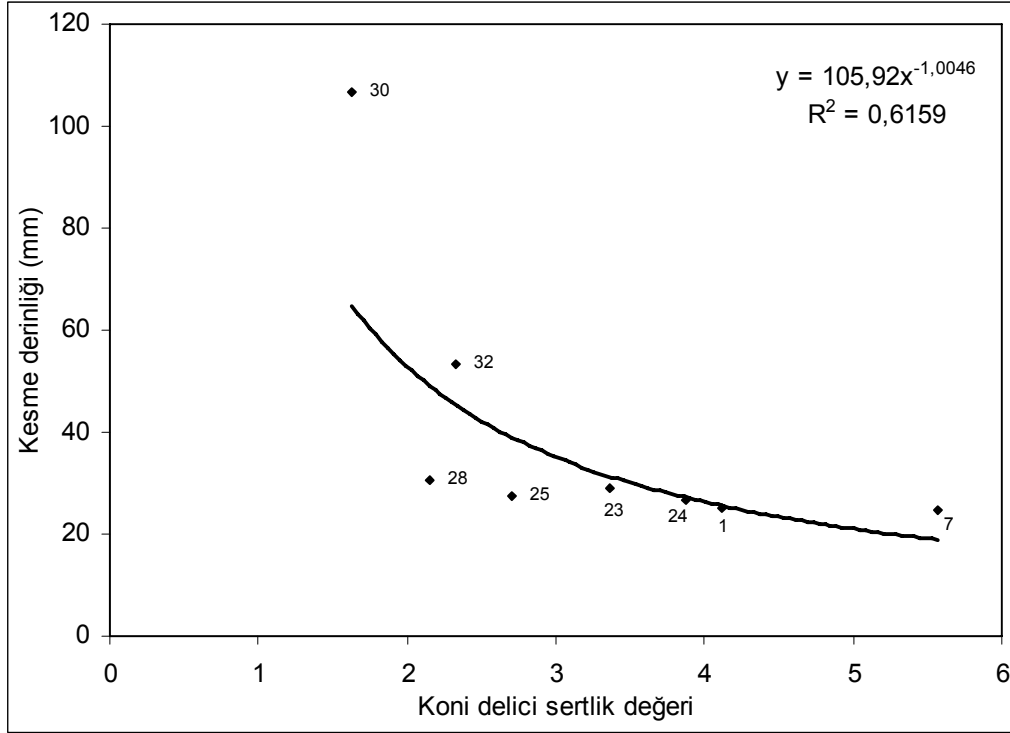
Böhme deneyi aslında aşındırıcılı su demetiyle kesimde oluşan tane aşındırması mekanizmasına benzerliği dolayısıyla özel bir öneme sahiptir. Deney sonuçları incelendiğinde Böhme aşınma miktarı arttıkça kesme derinliğinin üssel olarak arttığı görülmektedir.

Doğal taş örneklerinin Shore sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.6'da, Koni delici sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki ise Şekil 8.7'de verilmektedir.

Aşınma mekanizmalarında en önemli unsur iki malzemenin (aşındırıcı ve aşındırılan malzeme) sertlikleri arasındaki farktır. Bu fark ne kadar fazla olursa aşındırma işlemi o kadar verimli olmaktadır. Aşındırıcılı su demetiyle kesme deneylerinde su demeti içindeki aşındırıcı malzeme olan granat değişmediğinden farklı olan doğal taş örneklerinin sertlikleri önem kazanmaktadır. Shore ve Koni Delici sertlikleri ile kesme derinlikleri arasında bu nedenle yüksek ilişkiler görülmektedir. Doğal taş örneklerinin sertliklerinin artmasıyla kesme derinlikleri üssel olarak azalmaktadır.

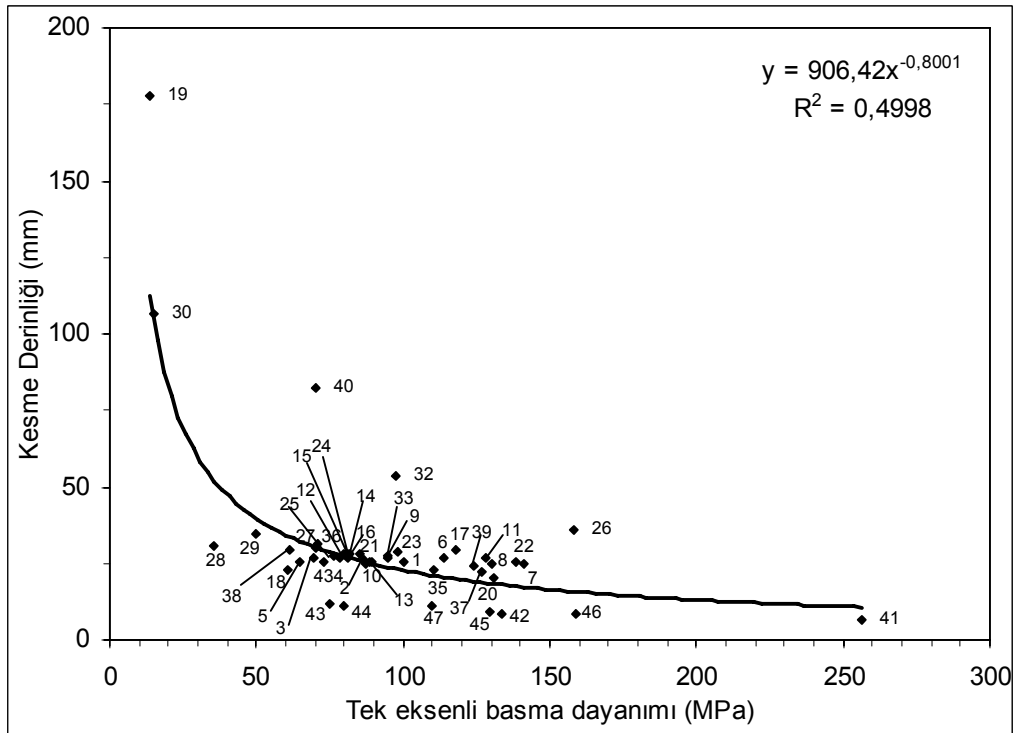


Şekil 8.6. Doğal taş örneklerinin Shore Scleroscope sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki



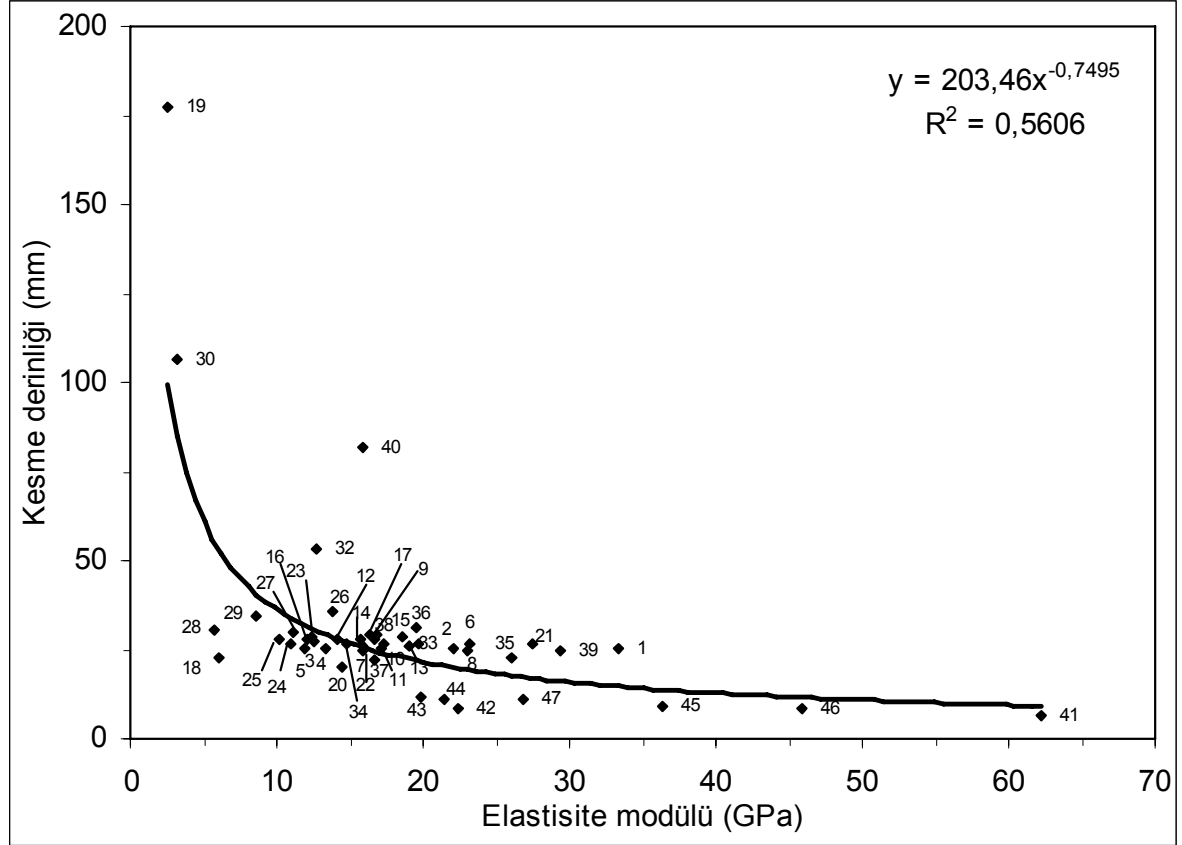
Şekil 8.7. Doğal taş örneklerinin Koni delici sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.8'de verilmektedir.



Şekil 8.8. Doğal taş örneklerinin tek eksenli basma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

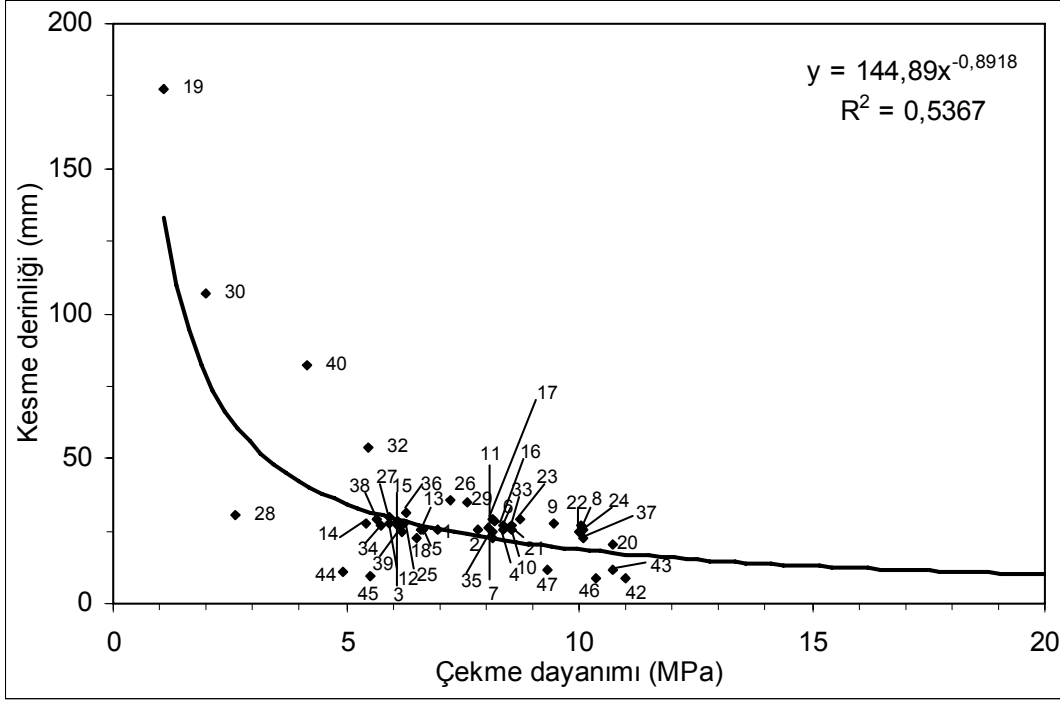
Örneklerin basma dayanımı ile kesme derinlikleri arasında ilişki görülememekle beraber farklı kayaç türleri için (örneğin sert taşlar) kendi içinde ilişki bulunmaktadır. Anlamlı bir ilişki bulunmaması, kesme işleminde malzeme üzerine doğrudan bir baskı kuvvetinin oluşmamasından kaynaklanabilir. Asıl kesme işlemi su demeti içindeki aşındırıcı taneler tarafından gerçekleştirilmektedir. Elastisite modülü grafiği için de benzer durum geçerlidir (Şekil 8.9).



Şekil 8.9. Doğal taş örneklerinin elastisite modülü ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Doğal taş örneklerinin çekme dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki Şekil 8.10'da verilmektedir.

Örneklerin çekme dayanımı ile kesme derinliği arasında çok iyi olmamakla birlikte bir ilişki bulunmaktadır. Çekme dayanımı arttıkça kesme derinliği üssel olarak azalmaktadır.



Şekil 8.10. Doğal taş örneklerinin çekme dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Grafikler incelendiğinde doğal taşların su demetiyle kesme derinliklerine etki eden en önemli fiziko-mekanik özelliklerinin, sertlik, birim hacim ağırlığı ve yüzey aşınma dayanımı olduğu görülmektedir.

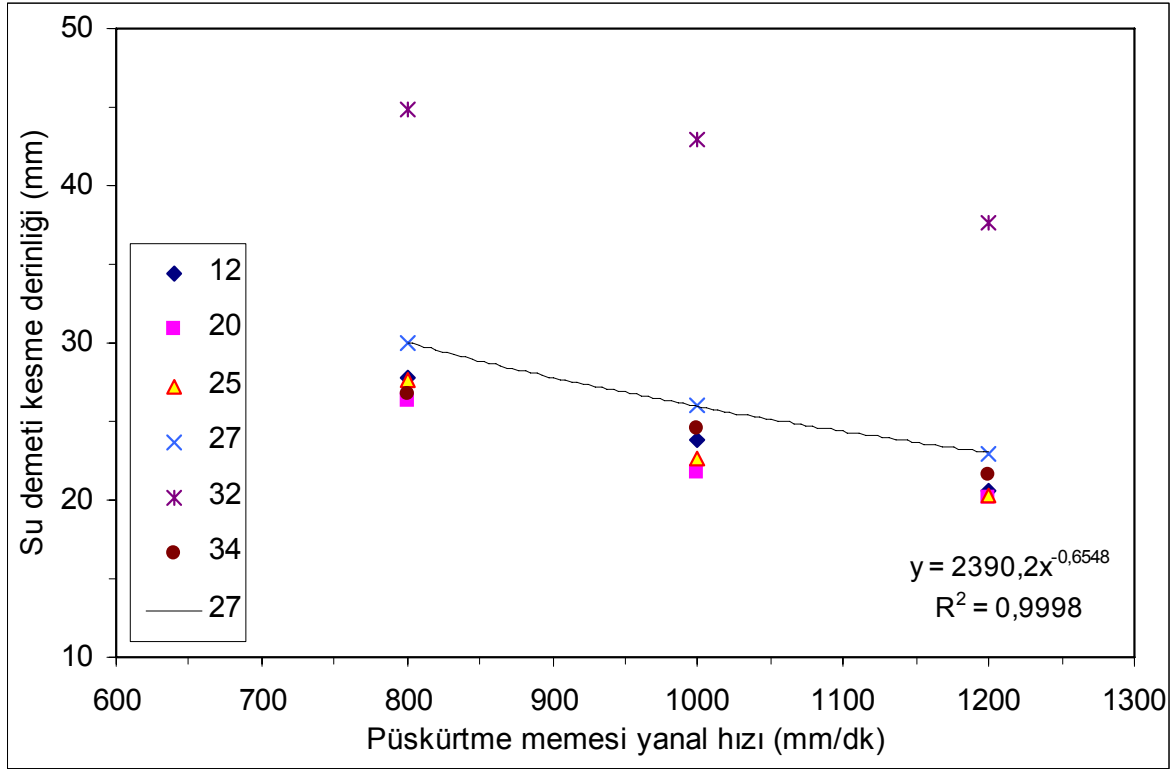
8.2. Kesme Parametreleri - Aşındırıcılı Su Demeti Kesme Derinliği Arasındaki İlişkiler

Bu bölümde püskürtme memesi yanal hızı, aşındırıcı besleme miktarı, pompa basıncı, püskürtme memesi doğal taş arası mesafe gibi kesme parametreleri ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Püskürtme memesi yanal hızı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki çeşitli örnekler için Şekil 8.11'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi su püskürtme memesi yanal hızı arttıkça kesme derinliği hızla azalmaktadır. Bu durum su demetinin kesme işlemini gerçekleştirmek için yeterli zamanı bulamamasından kaynaklanmaktadır.

Ayrıca aynı yanal hızda kayaç türüne göre genelleme yapmamakla beraber kireçtaşıdan kristalin mermere göre kesme derinliği bir değişim göstermektedir.

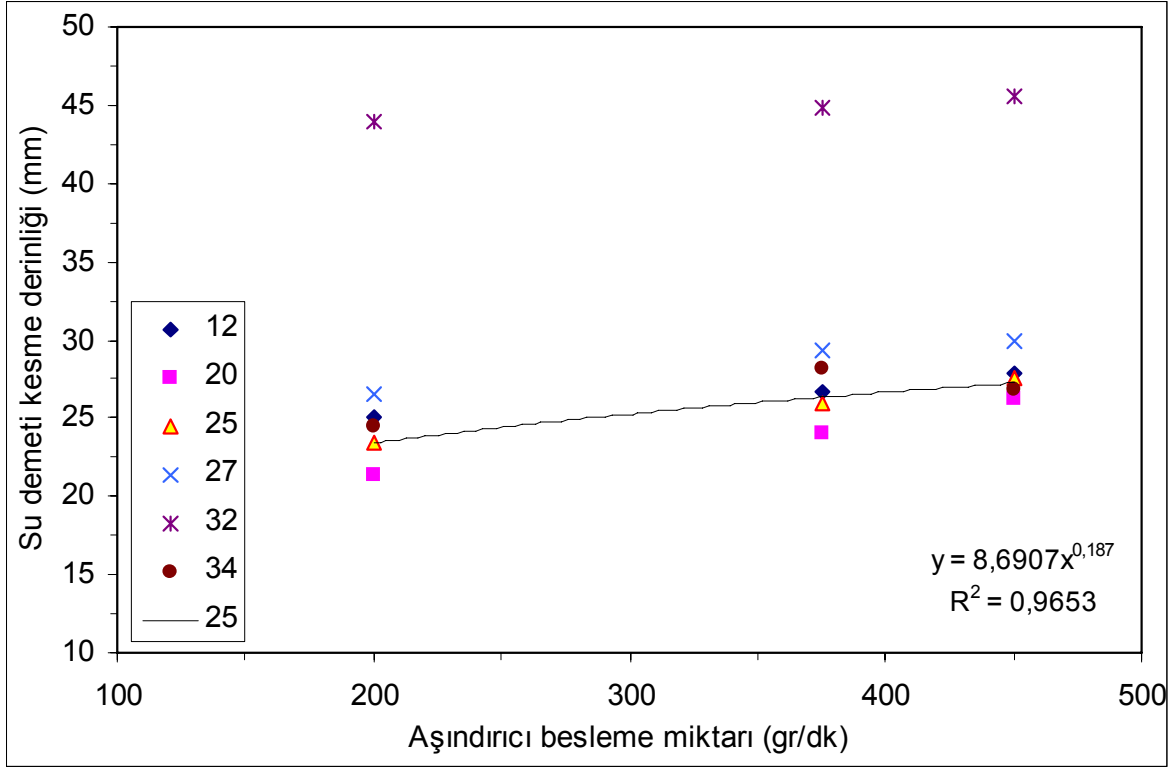
Püskürtme memesi yanal hızı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki 27 nolu örnek için Şekil 8.11'de grafik üzerinde gösterilmiştir.



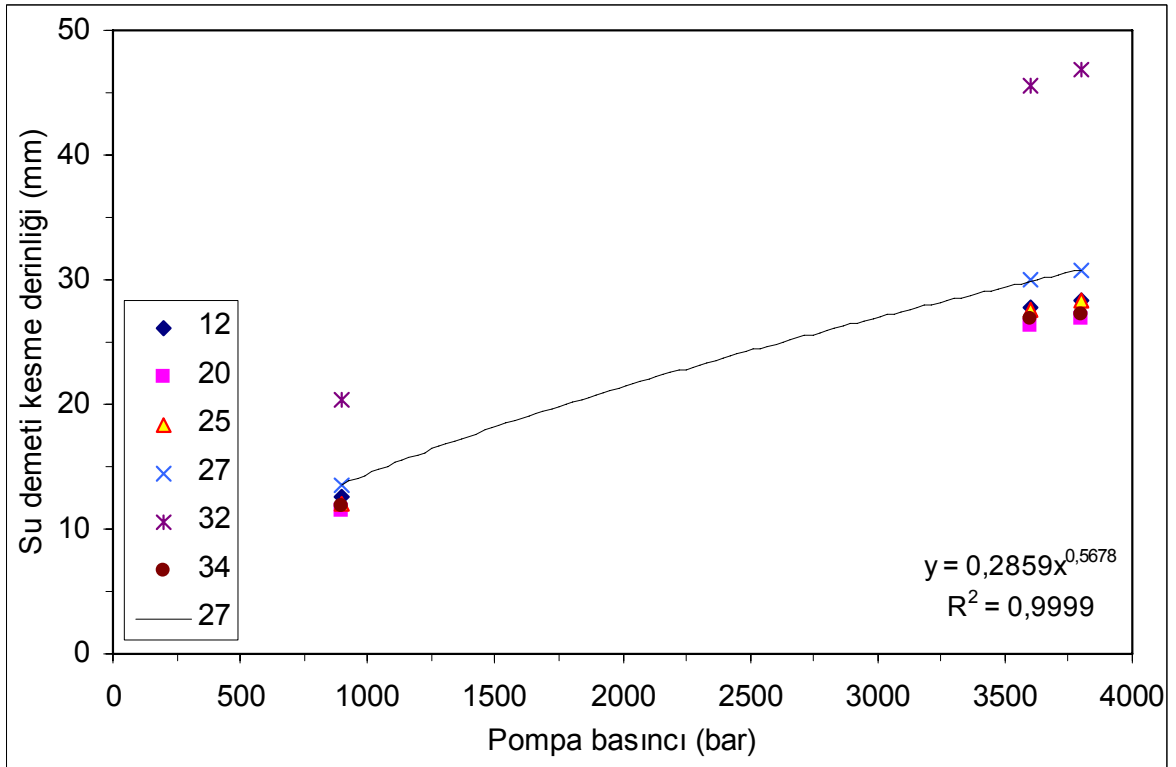
Şekil 8.11. Püskürtme memesi yanal hızı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

Aşındırıcı besleme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki çeşitli örnekler için Şekil 8.12'de verilmektedir. Aşındırıcı besleme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki 25 nolu örnek için Şekil 8.12'de grafik üzerinde gösterilmiştir.

Aşındırıcı besleme miktarı arttıkça su demetinin kesme derinliği artmaktadır. Fakat aralarında doğrusal bir ilişki bulunmadığından artış bir müddet sonra bir doygunluk değerine doğru yaklaşmaktadır. Aslında bu artış püskürtme memesinin çapıyla ilgilidir. Çapı belirli olan bir püskürtme memesinden belirli bir zamanda serbestçe geçebilecek aşındırıcı tane sayısı da sınırlı olduğundan bu artış bir noktadan sonra yavaşlayacak ve durma noktasına gelecektir. Daha fazla artırmak ise tıkanmalara yol açacaktır.



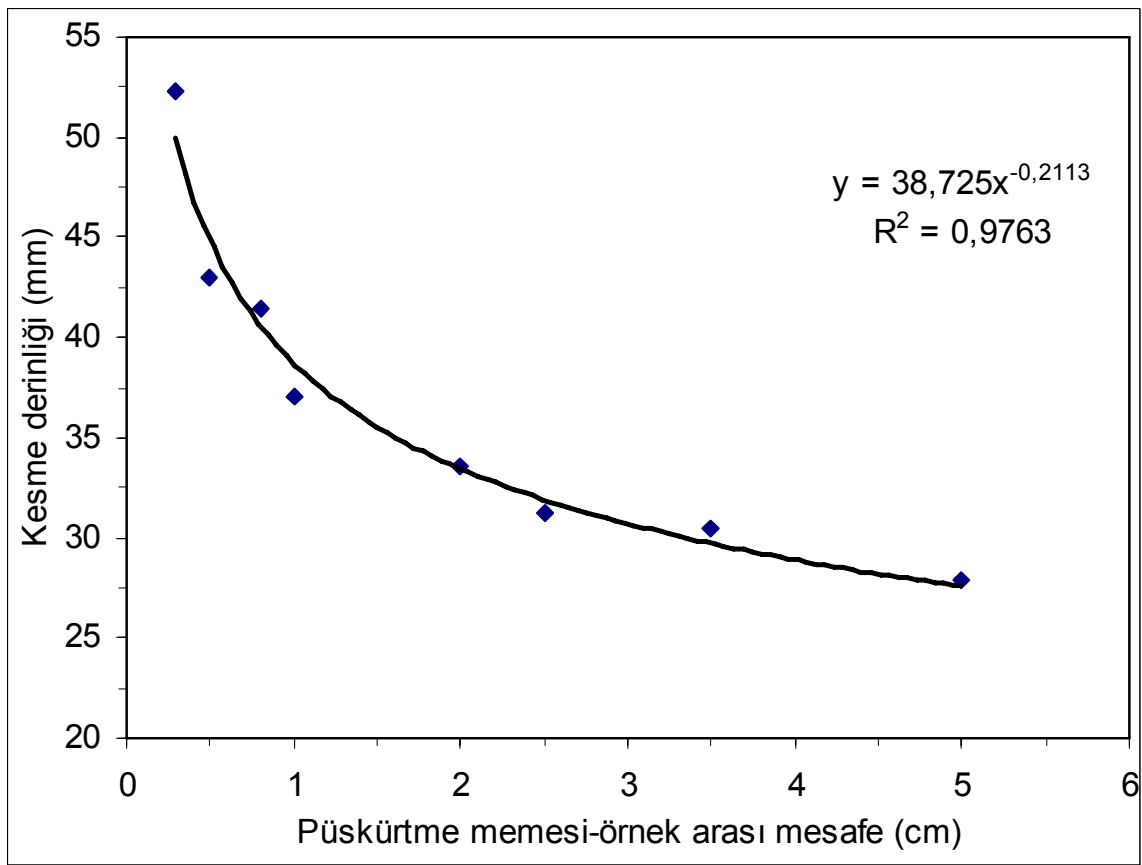
Şekil 8.12. Aşındırıcı besleme miktarı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki
Pompa basıncı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki çeşitli örnekler için Şekil 8.13'de verilmektedir.



Şekil 8.13. Pompa basıncı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki

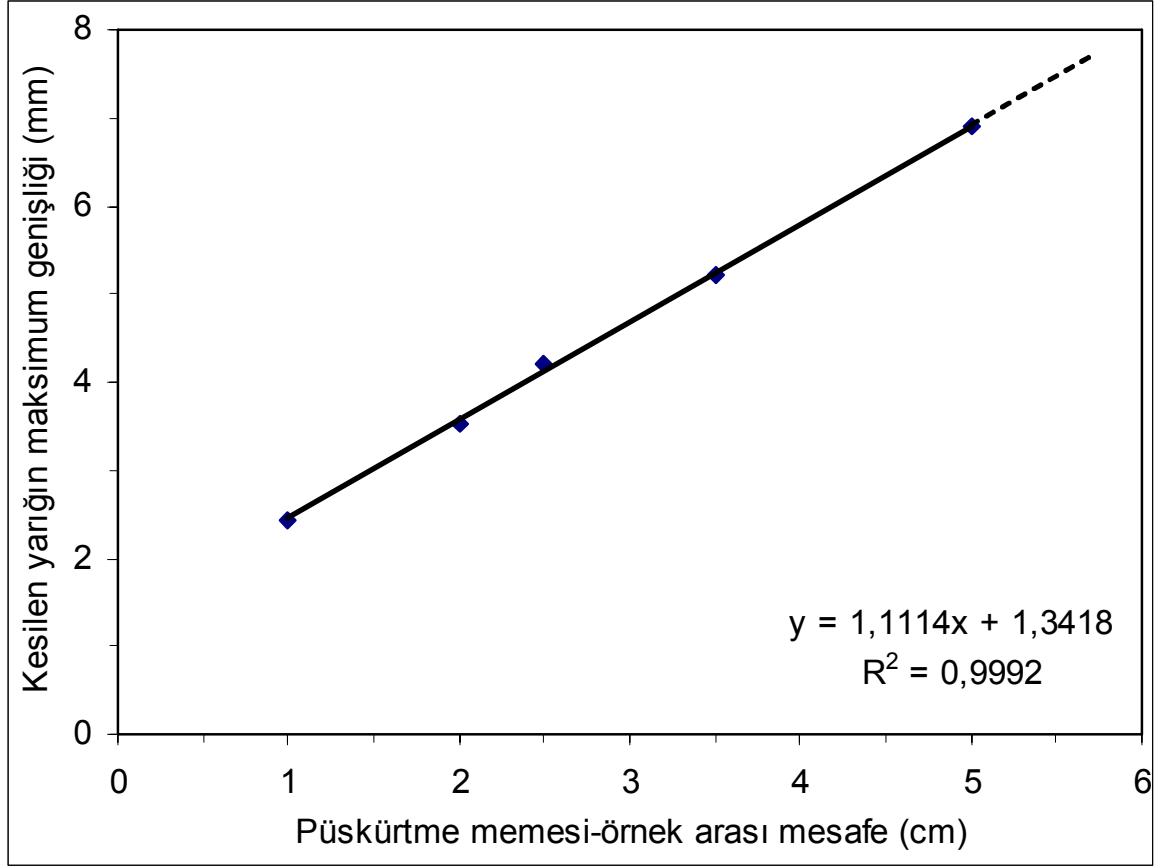
Pompa basıncı malzemeye uygulanan basıncı artırdığı için değil aslında kesme işlemini yapan aşındırıcı tanelerin hızını artırdığı için önemlidir. Pompa basıncı arttıkça kesme derinliği de artmaktadır. Pompa basıncı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki 27 nolu örnek için Şekil 8.13'de grafik üzerinde verilmektedir.

Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile su demeti kesme derinliği ve oluşan yarığın genişliği arasındaki ilişki 32 nolu örnek için ayrıntılı olarak incelenmiş ve grafik olarak Şekil 8.14 ve Şekil 8.15'de verilmektedir.



Şekil 8.14. Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki (32 nolu örnek için)

Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe arttıkça kesme derinliği üssel olarak azalmaktadır. Grafikten görüldüğü gibi kesme derinliği püskürtme memesi-doğal taş arası mesafeye oldukça bağımlıdır. Bu mesafe ne kadar az olursa kesme işleminin verimi o kadar yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, çok kısa mesafelerde su demeti geri tepme yapabileceğinden kesimin güvenli bir şekilde yapılabilmesi için yaklaşık 4mm'den daha büyük mesafelerde kesim yapılmalıdır.



Şekil 8.15. Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile kesilen yarığın genişliği arasındaki ilişki (32 nolu örnek için)

Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe arttıkça su demetindeki dağılmaya bağlı olarak kesme yarığının genişliği doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum kesme işleminin verimini düşürmektedir.

8.3. Doğal Taş Örnekleri için Kesme Derinliği Modelinin Geliştirilmesi

Bu araştırmada, su demetiyle kesme uygulamalarında temel kesilebilirlik kriteri olan kesme derinliğine doğal taş özelliklerinin ve kesme parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Doğal taş özelliklerinden birim hacim ağırlığı ve sertliği; kesme parametrelerinden ise püskürtme memesi yanal hızı, pompa basıncı ve aşındırıcı besleme miktarının kesme derinliği üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. İnce ve iri taneli mermerlerde mineral tane boyutunun da etkili olduğu görülmektedir.

Bu parametreler ile kesme derinliği arasındaki ilişkiler ve korelasyon katsayıları aşağıdaki eşitliklerde verilmektedir.

Kesme derinliği-Shore Scleresope sertliği arasındaki ilişki:

$$h = 7351.H_s^{-1,4219} \quad (R^2=0,92)$$

Kesme derinliği-Birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki:

$$h = -107,35.BHA + 313,6 \quad (R^2=0,84)$$

Kesme derinliği-Püskürtme memesi yanal hızı arasındaki ilişki:

$$h = 2390,2.V_n^{-0,6548} \quad (R^2=0,99)$$

Kesme derinliği-Aşındırıcı besleme miktarı arasındaki ilişki:

$$h = 8,6907.M_a^{-0,187} \quad (R^2=0,97)$$

Kesme derinliği-Pompa basıncı arasındaki ilişki:

$$h = 0,2803.P_p^{0,5707} \quad (R^2=0,99)$$

8.3.1. Regresyon Analizi

Öncelikle gerçek mermer (12 nolu numune) için kesme parametrelerinin kesme derinliğine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kesme derinliği üzerinde en çok etkili olan kesme parametrelerinden; püskürtme memesi yanal hızı, pompa basıncı, aşındırıcı besleme miktarı bağımsız değişken; oluşan kesme derinliği ise bağımlı değişken olarak seçilmiştir.

Daha sonra SPSS 9.0 istatistik programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon analizi uygulanmıştır. Analizde önce regresyon modeli oluşturulmuş ve modeldeki parametreler program yardımıyla %95 güven aralığında gerçek değerler ile modelle hesaplanan değerler arasında en yüksek korelasyon oluşana kadar iterasyon yapılarak belirlenmiştir.

Oluşturulan model daha önce belirlenen ilişkiler doğrultusunda, kesme parametreleriyle derinlik arasında üssel bir ilişkiyi ifade edecek şekilde Eşitlik 8.1'deki gibi oluşturulmuştur.

$$h = K \times \frac{P_p^a \times M_a^b}{V_n^c} \quad (8.1)$$

h : Kesme derinliği (mm),

P_p : Pompa basıncı (MPa),

M_a : Aşındırıcı besleme miktarı (g/dk),

V_n : Püskürtme memesi yanal hızı (mm/dk),

K, a, b, c : Modelde belirlenecek katsayılardır.

Program ile Çizelge 7.3'deki değerler kullanılarak yapılan doğrusal olmayan regresyon analizi ile 60 iterasyon sonucunda Eşitlik 8.1'de geçen katsayılar belirlenmiş ve Eşitlik 8.2. elde edilmiştir.

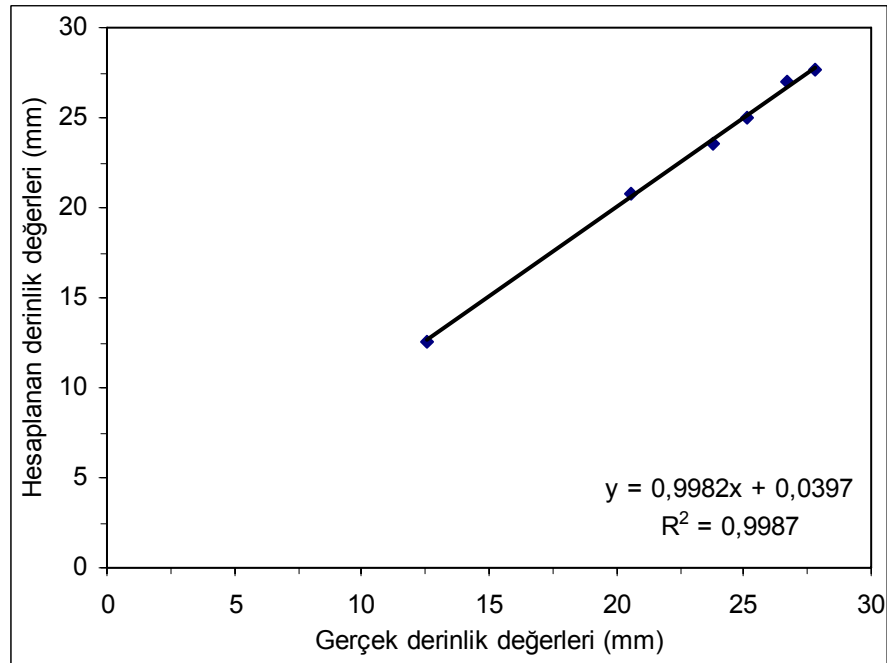
$$h = 53,25 \times \frac{P_p^{0,5665} \times M_a^{0,1225}}{V_n^{0,7089}} \quad (8.2)$$

%95 güven aralığı için belirlenen modelle hesaplanan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerleri Çizelge 8.1'de verilmiştir.

Çizelge 8.1. Deneysel çalışmalarda elde edilen kesme derinlikleri ile oluşturulan modelle hesaplanan kesme derinlik değerleri (12 nolu numune için)

Ölçülen Kesme Derinlikleri	Modelle Hesaplanan Derinlik Değerleri	Aradaki Fark
25,10	25,02	0,08
26,70	27,02	-0,32
12,60	12,60	0,00
27,80	27,63	0,17
23,80	23,59	0,21
20,60	20,73	-0,13

Belirlenen modelle hesaplanan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 8.16'da verilmiştir.



Şekil 8.16. Gerçek derinlik değerleri ile oluşturulan model yardımıyla belirlenen derinlik değeri arasındaki ilişki

Kesme parametrelerinin çalışmada kullanılan tüm örnekler için geçerli olmak üzere bir derinlik modeli geliştirilirken örneklerin kesme derinliğine en çok etkisi olan sertlik değerlerinin modelde yer alması uygun görülmüştür. Kesme derinliği için önerilen model Eşitlik 8.3'de verilmiştir.

$$h = K \times \frac{P_p^a \times M_a^b}{V_n^c \times H_s^d} \quad (8.3)$$

h : Kesme derinliği (mm),

P_p : Pompa basıncı (MPa),

M_a : Aşındırıcı besleme miktarı (g/dk),

V_n : Püskürtme memesi yanal hızı (mm/dk),

H_s : Shore sertliği

K, a, b, c : Modelde belirlenecek katsayılarıdır.

Modeldeki katsayıların belirlenmesinde Çizelge 6.5'deki örneklerin Shore sertlik değerleri ile Çizelge 7.3'de bulunan tüm örnekler ve tüm koşullar dikkate alınmıştır. Tüm bu veriler SPSS 9.0 istatistik bilgisayar programına girilmiş ve yapılan doğrusal olmayan regresyon analizi ile 129 iterasyon sonucunda Eşitlik 8.3'de geçen katsayılar %95 güven aralığı için belirlenmiş ve Eşitlik 8.4. elde edilmiştir.

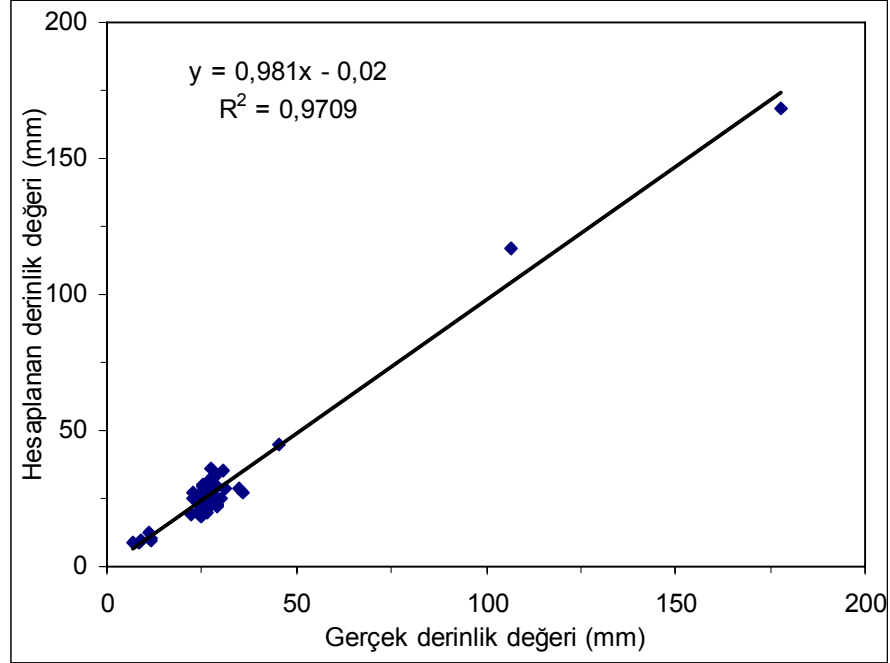
$$h = 9809 \times \frac{P_p^{0,6049} \times M_a^{0,1860}}{V_n^{0,7216} \times H_s^{1,4683}} \quad (8.4)$$

Shore sertliği, pompa basıncı, aşındırıcı besleme miktarı ve püskürtme memesi yanal hızını içeren modelle hesaplanan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerleri Çizelge 8.2'de verilmektedir.

Çizelge 8.2. Deneysel çalışmalarda elde edilen kesme derinlikleri ile oluşturulan modellerle hesaplanan kesme derinlik değerleri

Örnek No	Ölçülen derinlik değerleri (mm)	Model yardımıyla hesaplanan derinlik değerleri (mm)	Derinlik değerleri arasındaki farklar (mm)
1	25,2	25,47	-0,3
2	25,1	30,40	-5,3
3	27,1	31,88	-4,8
4	25,2	29,47	-4,3
5	25,2	28,08	-2,9
6	26,8	29,84	-3,0
7	24,8	18,33	6,5
8	25,0	21,97	3,0
9	27,6	25,40	2,2
10	25,4	24,71	0,7
11	26,5	24,92	1,6
12	27,8	33,16	-5,4
13	25,7	26,27	-0,6
14	27,9	32,83	-4,9
15	28,3	32,83	-4,5
16	28,1	26,65	1,5
17	29,2	23,01	6,2
18	22,7	25,33	-2,6
19	177,6	168,66	8,9
20	26,3	21,07	5,2
21	26,4	19,94	6,5
22	25,8	20,76	5,0
23	28,9	29,29	-0,4
24	26,8	24,06	2,7
25	27,6	35,74	-8,1
26	35,9	27,35	8,6
27	30,0	24,78	5,2
28	30,4	35,13	-4,7
29	34,6	28,33	6,3
30	106,6	117,27	-10,7
32	45,5	45,19	0,3
33	26,6	24,25	2,4
34	26,8	22,37	4,4
35	22,7	26,88	-4,2
36	31,2	28,33	2,9
37	22,3	19,26	3,0
38	29,1	21,70	7,4
39	24,5	20,52	4,0
41	6,7	8,67	-2,0
42	8,8	9,83	-1,0
43	11,8	10,36	1,4
44	11,2	12,37	-1,2
45	9,2	9,21	0,0
46	8,6	8,90	-0,3
47	11,4	9,62	1,8

Oluşturulan modelle hesaplanan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerleri arasındaki ilişki ise Şekil 8.17’de verilmiştir.



Şekil 8.17. Gerçek derinlik değerleri ile oluşturulan model yardımıyla belirlenen derinlik değerleri arasındaki ilişki

Kesme derinliğinin hesaplanmasında kullanılmak üzere genel modelin (Eşitlik 8.4) geliştirilmesinde Çizelge 7.3’deki doğal taş türlerinin hepsi kullanılmıştır. Bunlar arasında kristalin mermer, kireçtaşı, limra türü doğal taşlar bulunmaktadır. Farklı yapıdaki doğal taşlar ayrı ayrı kesme derinliği modelinin oluşturulmasında kullanıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

Kristalin mermerler için:

$$h = 93.514 \times \frac{P_p^{0,6945} \times M_a^{0,5008}}{V_n^{1,4186} \times H_s^{1,4833}} \quad (8.5)$$

Kireçtaşları için:

$$h = 1340 \times \frac{P_p^{0,4792} \times M_a^{-0,0156}}{V_n^{0,1337} \times H_s^{1,4537}} \quad (8.6)$$

Diğer yumuşak doğal taşlar için:

$$h = 3333 \times \frac{P_p^{0,5804} \times M_a^{0,0423}}{V_n^{0,4059} \times H_s^{1,4696}} \quad (8.7)$$

8.3.2. Önerilen Kesme Derinliği Modelinin Literatürdeki Modellerle Karşılaştırılması

Bu çalışmada önerilen kesme derinliği modelini diğer modellerle karşılaştırmak amacıyla başka araştırmacıların geliştirdikleri modellerde kullandığımız kesme parametreleri ve malzeme özelliklerini yerine konulup hesaplamalar yapılmıştır.

Yazıcı (1989) tarafından geliştirilen model aşağıda verilmektedir:

$$h = c_0 \cdot p^{c_1} \cdot m_A^{c_2} \cdot d_f^{c_4} \quad (8.8)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
- p : Su (pompa) basıncı (MPa),
- m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
- d_f : Odaklama tüpü çapı (mm),
- C1 : 1,012,
- C2 : 0,318,
- C4 : 0,308,
- C0 : 3,799.

Değerler yerine koyulduğunda;

$$h = 3,799 \cdot (360)^{1,012} \cdot (450/60)^{0,318} \cdot (0,76)^{0,308}$$

$$h = 2549 \text{ mm}$$

Bu değer bu çalışma kapsamında tüm kayaç türleri için verilen koşullarda gerçekte ulaşılan kesme derinliğinden oldukça yüksektir. Bu durum aşındırıcılı su demeti oluşturma sisteminin farklı olmasından kaynaklanabilir.

Ihoshi et al. (1986) tarafından aşındırıcılı su demetiyle kayaçların kesilmesinde geliştirdikleri model aşağıda verilmiştir.

$$h = \left[c_{01} + c_{02} \cdot \left(\frac{m_A}{m_W} \right) c_2 \right] \cdot \frac{P_W}{v \cdot X} \quad (8.9)$$

Burada;

- h : Kesme derinliği (mm),
P_w : Su (pompa) basıncı (MPa),
m_A : Aşındırıcı debisi (g/s),
m_w : Su debisi (g/s),
x : Durma mesafesi (cm),
v : Püskürtme memesi yanal hızı (cm/s),
c₀₁ : 0,44,
c₀₂ : 5,55,
c₂ : 0,762.

Değerler yerine koyulduğunda;

$$h = \left[0,44 + 5,55 \cdot \left(\frac{7,5}{1,5} \right)^{0,762} \right] \cdot \frac{360}{80 \cdot 0,5}$$

$$h = 174\text{mm}$$

lihoshi et al. (1986) tarafından geliştirilen modelde bulunan değerler bu çalışmadaki yumuşak kayaçların kesim değerlerine yakın sonuçlar vermesine rağmen sert kayaçlarda çok büyük farklılıklar göstermekte olup, sapma çok fazladır.

9. ÇEŞİTLİ KESME YÖNTEMLERİ İÇİN KESMEDE GEREKEN ÖZGÜL ENERJİ DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Özgül enerji terimi, birim hacimdeki kayacı kesmek için gerekli enerji miktarını ifade etmektedir. Çalışmanın bu bölümünde aşındırıcılı su demeti kesme yöntemiyle birlikte doğal taşların kesiminde en çok kullanılan diğer kesme yöntemleri uygulanarak aynı özelliklerdeki kayaların bu kesme yöntemleriyle kesiminde özgül enerji değerlerindeki değişimler araştırılmıştır. Böylece, doğal taşların kesiminde en düşük enerji gereksiniminin hangi yöntemde olduğu ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Kesme yöntemleri olarak; mermer levhalarından dekoratif ürünler kesilmesinde kullanılan aşındırıcılı su demetli kesim makinelerinde uygulanan aşındırıcılı su demeti kesme yöntemi, mermer blok kesme ve ebatlamada kullanılan zincirli kollu kesicilerde uygulanan keski ile kesme yöntemi ve blok mermerden levha üretimi ve bunların ebatlanmasında kullanılan mermer kesme makinelerinde uygulanan dairesel testere ile kesme yöntemi seçilmiştir.

Keski ile kesme yöntemi küçük boyutlu kazı setinde, dairesel testere ile kesme yöntemi bilgisayar kontrollü yan kesme makinesinde, aşındırıcılı su demeti ile kesme yöntemi ise aşındırıcılı su demetli kesim makinesinde uygulanmıştır.

Bazı doğal taş örnekleri seçilerek bunlar üzerinde aşındırıcılı su demeti, dairesel testere ve küçük boyutlu kazı setindeki keski ile kesme deneyleri gerçekleştirilerek özgül enerji ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak farklı kesme yöntemlerinde oluşan özgül enerji değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Bu amaçla daha önce arazi çalışmalarıyla alınan Antalya Limra, Afyon Andezit, Uşak Yeşili, Bilecik Bej, Denizli Traverten, Ege Bordo, Küfeki Taşı (1), Uşak Beyaz doğal taşlarına ek olarak Emirdağ Traverten, Küfeki Taşı (2), Afyon Ayazini Tüf ve Beytepe Marn kayaları da özgül enerji ölçümleri için kullanılmıştır.

Bu örneklerden aşındırıcılı su demetiyle, dairesel testereyle ve küçük boyutlu kazı seti ile kesme deneyleri yapılmak üzere 5 cm x 10 cm x 20 cm boyutlarında standart test numuneleri hazırlanmıştır.

9.1. Küçük Boyutlu Kazı Setiyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneylerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması

Zincirli kollu kesicilerde olduğu gibi keski yardımıyla gerçekleştirilen kesme işlemini temsil eden deney, mekanize kazı makinelerinin kazı hızlarının ve verimliliklerinin önceden kestirilebilmesinde kullanılan küçük boyutlu kazı setidir. Kesme deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Kazı Teknolojisi ve Maden Makineleri Laboratuvarı'nda bulunan küçük boyutlu kazı setinde (Şekil 9.1) 12 farklı doğal taş örneği için (Şekil 9.2) yapılmıştır.



Şekil 9.1. Küçük boyutlu kazı deney seti



Şekil 9.2. Küçük boyutlu kazı deney setinde deney yapılan bir örnek

Küçük boyutlu kazı seti, 18 kW'lık bir elektrik motoru ile tahrik edilen bir planya makinesidir. Deney esnasında, kayaç numunesi planyanın sehpasına sabitlenir ve

aşağı-yukarı, sola-sağa hareket ettirilerek, kesme derinliği, keskinler arası mesafe gibi parametrelerin etkileri incelenebilmektedir.

Küçük boyutlu kazı setinde tüm kazı deneyleri 12.5 mm genişliğinde standart keski, temizleme açısı 5°, kesme açısı -5°, kesme hızı 18 cm/sn, kesme derinliği 5 mm ve data toplama hızı 2000 Hz olmak üzere sabit tutulmuştur. Veri erişim sistemi olarak, kesme esnasında ortaya çıkan milivolt seviyesindeki sinyaller bir analog-dijital I/O bilgisayar kartına beslenmekte ve bir bilgisayar aracılığı ile toplanmaktadır. Bilgisayardan alınan bu sinyaller kazı mekaniği prensipleri doğrultusunda değerlendirilmekte ve kuvvetler hesaplanmaktadır (Balci, 2005).

Küçük boyutlu doğrusal kazı setinde yapılan kaya kesme deneylerinde elde edilen verilere dayanarak özgül enerji aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır (Bilgin, 1989).

$$\text{Özgül Enerji} = \frac{F_{c_{ort}}}{Q} \quad (9.1)$$

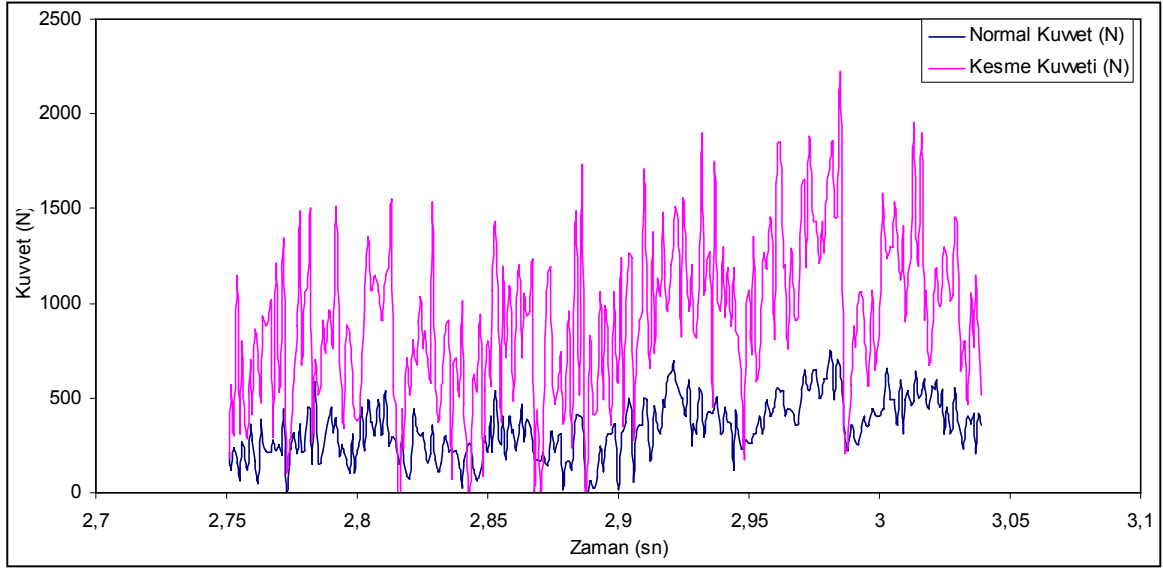
Burada:

$F_{C_{ort}}$ (kN): Ortalama kesme kuvveti; kesme doğrultusunda keskiye gelen tüm kuvvetlerin ortalamasıdır.

Q (m^3/km); Birim kesme mesafesinde açığa çıkan pasa hacmidir. Pasa kütlesi ve kayacın yoğunluğundan pasa hacmi hesaplanabilmektedir.

Ortalama kesme kuvveti, keskinin örneğe girdiği ve örneği terkettiği noktalar arasında kalan kısımda kesme doğrultusu boyunca keskiye gelen kuvvetlerin ortalamasıdır.

30 nolu Küfeki Taşı 1 isimli doğal taş örneğinde küçük boyutlu kazı setiyle yapılan kesme deneyinde keskiye gelen normal ve kesme kuvvetleri Şekil 9.3'de verilmektedir.



Şekil 9.3. 30 nolu örnek için küçük boyutlu kazı setiyle yapılan kesme deneyinde kesimde oluşan normal ve kesme kuvvetleri

Normal kuvvet için kesme deney sonuçları aşağıda verilmektedir:

Ortalama normal kuvvet (N)	:	337,9
Standart sapma (N)	:	152,6
Pik normal kuvvet (N)	:	749,5

Kesme kuvveti için kesme deney sonuçları aşağıda verilmektedir:

Ortalama kesme kuvveti (N)	:	910,9
Standart sapma (N)	:	421,6
Pik kesme kuvveti (N)	:	2207,6

Kayaç malzemesi ile ilgili deney sonuçları:

Kesme boyu (L, cm)	:	17,5	(0,175 m)
Pasa miktarı (g)	:	14,39	(0,014 kg)
Kayaç yoğunluğu (g/cm ³)	:	1,95	(1950 kg/m ³)

Birim kesme mesafesinde oluşan pasa hacmi:

$$Q \text{ (m}^3\text{/km)} = ((\text{Pasa miktarı (kg)} / \text{Kayaç yoğunluğu (kg/m}^3\text{))} / L \text{ (km)})$$

$$Q \text{ (m}^3\text{/km)} = (0,01439 \text{ kg} / 1950 \text{ kg/m}^3) / 17,5 \cdot 10^{-5} \text{ km} = 0,04217 \text{ m}^3\text{/km}$$

$$\text{Özgül enerji (Ö.E.)} = \frac{\text{Kesme Kuvveti}}{\text{Pasa Hacmi / Yol}} = \frac{910,9 \text{ N}}{0,04217 \text{ m}^3/\text{km}} = \frac{910,9 \text{ N} \times 1000 \text{ m}}{0,04217 \text{ m}^3}$$

$$= \frac{910900 \text{ J}}{0,04217 \text{ m}^3} = 21,6 \text{ MJ/m}^3$$

Diğer örnekler için de aynı yol izlenerek özgül enerji değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar topluca Çizelge 9.1'de verilmektedir. Yapılan deneyler ve hesaplamalar sonucunda en düşük özgül enerji değeri Küfeki Taşı 1 adlı doğal taş örneğinde, en yüksek özgül enerji değeri ise Ege Bordo isimli doğal taş örneğinde gözlenmiştir.

Çizelge 9.1. Bazı doğal taş örneklerinin küçük boyutlu kazı setinde kesilmesinde gereken özgül enerji değerleri

No	Örnek adı	Ortalama Kesme Kuvveti (N)	Kesme Boyu L (cm)	Oluşan Pasa Miktarı (g)	Kayaç Yoğunluğu (g/cm ³)	Pasa Hacmi Q (m ³ /km)	Özgül Enerji (MJ/m ³)	Ortalama Özgül Enerji (MJ/m ³)
32	Antalya Limra	2404,1	18,50	19,96	2,38	0,045	53,032	59,01
		2729,7	8,50	9,14	2,38	0,045	60,418	
		2741,2	9,00	10,22	2,38	0,048	57,453	
		2422,7	18,00	15,93	2,38	0,037	65,153	
23	Uşak Yeşil	3278,6	13,50	15,98	2,72	0,044	75,338	75,07
		3358,1	19,00	23,20	2,72	0,045	74,803	
20	Bilecik Bej	2056,4	19,00	17,35	2,69	0,034	60,577	81,27
		2450,1	9,50	9,19	2,69	0,036	68,131	
		2799,6	15,00	13,90	2,69	0,034	81,269	
24	Ege Bordo	3958,0	19,00	23,30	2,75	0,045	88,758	90,36
		3689,5	18,50	17,71	2,75	0,035	105,987	
		3518,4	18,50	23,45	2,75	0,046	76,332	
25	Uşak Beyaz	3100,4	18,00	20,94	2,71	0,043	72,222	72,17
		2845,6	18,00	19,25	2,71	0,039	72,109	
28	Denizli Traverten	3501,6	18,50	17,86	2,41	0,040	87,413	77,09
		2564,5	19,50	19,60	2,41	0,042	61,489	
		4395,1	18,00	23,15	2,41	0,053	82,357	
30	Küfeki Taşı 1	910,9	17,50	14,39	1,95	0,042	21,601	22,48
		1054,3	17,50	15,40	1,95	0,045	23,361	
52	Emirdağ Traverten	1955,1	10,00	8,19	2,70	0,030	64,337	67,71
		2189,0	10,00	8,30	2,70	0,031	71,077	
51	Küfeki Taşı 2	767,8	9,50	5,84	1,76	0,035	21,921	25,40
		1511,2	7,50	6,89	1,76	0,052	28,870	
19	Afyon A. Tüf	976,8	7,00	4,48	1,51	0,042	23,046	24,37
		1108,6	7,00	4,56	1,51	0,043	25,699	
53	Beytepe Marn	2855,3	11,50	19,15	2,30	0,073	39,369	35,42
		1976,6	13,00	18,75	2,30	0,063	31,466	
40	Afyon Andezit	1794,1	11,00	10,26	2,12	0,044	40,777	38,67
		1669,6	11,00	10,65	2,12	0,046	36,558	

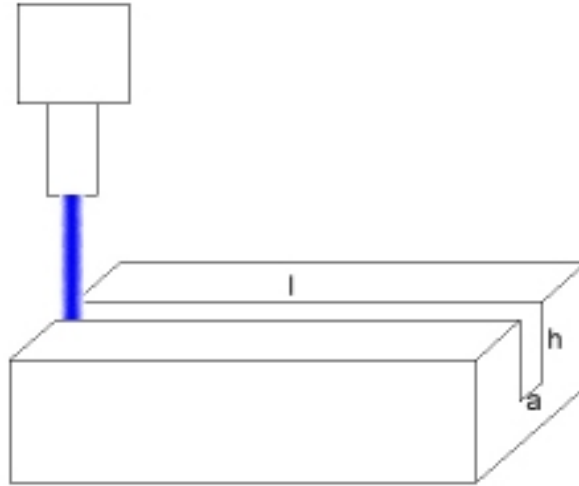
9.2. Aşındırıcılı Su Demetiyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneğinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması

Geleneksel kesme yöntemlerinde keski veya benzeri katı bir kesici ucun uyguladığı kuvvet sonucu kesme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu tip uygulamalarda harcanan enerji kesmede uygulanan kuvvet ile bu kuvvetin aldığı yolun çarpımıyla hesaplanmaktadır.

Su demetiyle kesme uygulamalarında doğrudan pompa gücünden gidilerek hesaplanan su demetinin kayaca uyguladığı normal kuvvet, kesme kuvveti olarak kabul edilmiş ve özgül enerji hesaplamaları bu kuvvet kullanılarak yapılmıştır.

$$\text{Kesme kuvveti (N)} = \text{Pompa basıncı (MPa)} \times \text{Su demetinin kesit alanı (mm}^2\text{)} \quad (9.2)$$

$$\text{Özgül enerji} = \frac{\text{Enerji (İş)}}{\text{Pasa Hacmi}} = \frac{\text{Kesme Kuvveti} \times \text{Yol}}{\text{Pasa Hacmi}} \quad (9.3)$$



Şekil 9.4. Özgül enerji ölçümü amacıyla su demetiyle kesimde kullanılan örneğin şematik görünümü

32 numaralı Antalya Limra doğal taşı için aşındırıcılı su demetiyle kesimde örnek özgül enerji hesaplaması aşağıda verilmektedir:

Pompa basıncı: 360 MPa

Püskürtme memesi çapı: 1,1 mm

Kesme kuvveti (N) = Pompa basıncı (MPa) x Su demetinin kesit alanı (mm²)

$$\text{Kesme kuvveti (N)} = 360 \text{ MPa} \times (1,1 \text{ mm} / 2)^2 \times 3,14 = 342 \text{ N}$$

$$\text{Püskürtme memesi yanal hızı:} \quad 800 \text{ mm/dk} = 1,33 \text{ cm/sn}$$

Kesilen yarığın boyutları (Şekil 9.4): Ortalama kesme derinliği (h): 45,5 mm

$$\text{Genişlik (a):} \quad 1,2 \text{ mm}$$

$$\text{Uzunluk (l):} \quad 10 \text{ cm (0.1 m)}$$

$$\text{Kesmede harcanan enerji:} \quad 342 \text{ N} \times 0,1 \text{ m} = 34,2 \text{ Joule}$$

$$\text{Kesilen hacim:} \quad 0,12 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 4,55 \text{ cm} = 5,46 \text{ cm}^3$$

$$\text{Özgül enerji} = \frac{\text{Kesme Kuvveti} \times \text{Yol}}{\text{Pasa Hacmi}} = \frac{34,2 \text{ J}}{5,46 \text{ cm}^3} = 6,26 \text{ J/cm}^3 = 6,26 \text{ MJ/m}^3$$

Tüm örnekler aynı çaplı su püskürtme memesi ile ve aynı basınçta kesildiğinden kesme kuvveti tüm örnekler için 342 N olarak alınmıştır. Hazırlanan örneklerin su demetiyle kesim işlemi gerçekleştirilmiş ve gereken özgül enerji değerleri her örnek için yukarıdaki gibi hesaplanmıştır. Sonuçlar Çizelge 9.2'de verilmektedir.

Çizelge 9.2. Su demeti kesme derinlikleri ve özgül enerji değerleri

Örnek No	Örnek Adı	Su demeti kesme derinliği (mm)	Oluşan pasa hacmi (cm ³)	Özgül Enerji MJ/m ³
32	Antalya Limra	45,50	5,46	6,26
23	Uşak Yeşil	28,90	3,47	9,86
20	Bilecik Bej	26,30	3,16	10,84
24	Ege Bordo	26,80	3,22	10,63
25	Uşak Beyaz	27,60	3,31	10,33
28	Denizli Traverten	30,40	3,65	9,38
30	Küfeki Taşı 1	106,60	12,79	2,67
52	Emirdağ Traverten	33,52	4,02	8,50
51	Küfeki Taşı 2	136,00	16,32	2,10
19	Ayazini Tüf	177,58	21,31	1,60
53	Beytepe Marn	103,76	12,45	2,75
40	Afyon Andezit	82,01	9,84	3,48

Aşındırıcılı su demeti ile kesme deneylerinde en düşük özgül enerji değeri 19 nolu Afyon Ayazini tufünde görülürken, en yüksek özgül enerji değeri 20 nolu Bilecik Bej isimli doğal taş örneğinde görülmüştür.

9.3. Dairesel Testereyle Yapılan Doğal Taş Kesme Deneylerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Hesaplanması

Doğal taş örneklerinin dairesel testereyle kesimi Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü, Mermer Laboratuvarında bulunan bilgisayar kontrollü dairesel testereli yan kesme makinesinde (Şekil 9.5) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 9.5. Bilgisayar kontrollü dairesel testereli yan kesme makinesi

Bilgisayar kontrollü yan kesme makinesinde kesme parametreleri aşağıdaki gibi sabit tutularak kayaç özelliklerine göre özgül enerji değişimleri incelenmiştir:

Testere çapı:	400 mm
Testere çevresel hızı:	50 m/s
Kesme hızı:	200 mm/dk
Kesme derinliği:	30 mm

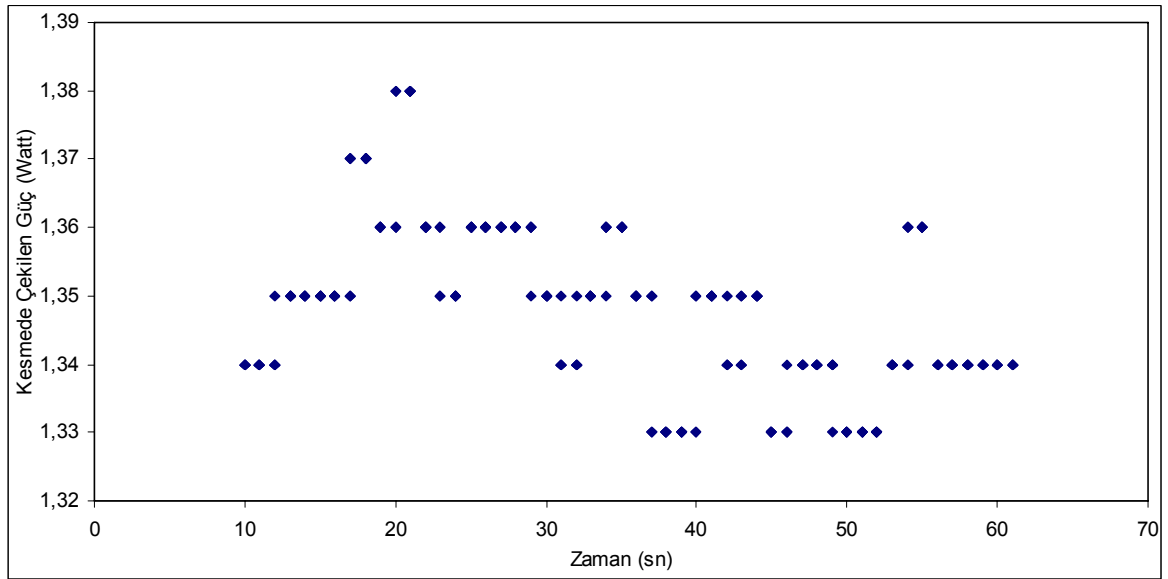
Kesme makinesinde, elektronik şebeke analizörü yardımıyla kesme sırasında harcanan güç değeri okunabilmektedir. Güç değerleri, anlık motorun çektiği akım

ve voltaj değerlerinden yararlanılarak hesaplanmaktadır. Boşta çalışırken kullanılan güç değerinin kesme sırasındaki kullanılan güç değerlerinden çıkarılmasıyla kesme işleminde kullanılan net güç değeri belirlenmektedir. Kesme süresi ile kullanılan gücün çarpımıyla kesme işleminde kullanılan enerji değeri hesaplanmaktadır. Bu değer kesme hacmine oranı da özgül enerji değerini vermektedir.

Özgül enerji değerleri aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanmıştır:

$$\text{Özgül enerji} = \frac{\text{Ortalama çekilen net güç (Watt)} \cdot \text{Kesme süresi (sn)}}{\text{Pasa hacmi (cm}^3\text{)}}$$

32 numaralı Antalya Limra doğal taşı için örnek özgül enerji hesaplaması aşağıda verilmektedir:



Şekil 9.6. 32 nolu örnek için dairesel testereyle yapılan kesme deneyinde geçen süreye karşılık harcanan güç değerlerinin değişimi

Kesim sırasında, kullanılan güç değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 9.6'de verildiği gibi bilgisayar ortamında kaydedilmektedir. Bu grafikteki güç değerlerinin ortalaması alınarak kesim sırasında kullanılan ortalama güç değeri hesaplanmaktadır. Benzer biçimde dairesel testere kesim yapmadan boşta çalışırken kullanılan ortalama güç değeri de hesaplanmaktadır.

Kesim sırasında kullanılan ortalama güç: 1,351 watt

Makine boş çalışırken kullanılan güç: 1,130 watt

Kullanılan ortalama net güç:	0,221 watt
Kesme hızı:	200 mm/dk
Net kesme boyu:	10 cm (30 sn sürer)
Kesme aralığı:	4,6 mm
Kesme derinliği:	30 mm
Kesilen hacim:	10 cm x 0,46 cm x 3 cm = 13,8 cm ³
Harcanan Enerji:	0,221 watt x 30 sn= 6,63 watt.sn (Joule)

$$\text{Özgül Enerji} = 6,63 \text{ Joule} / 13,8 \text{ cm}^3 = 0,480 \text{ Joule/cm}^3 = 0,480 \text{ MJ/m}^3$$

Kesim kanalının derinliği, uzunluğu ve genişliği sabit tutulduğundan oluşan pasa hacmi tüm örnekler için 13,8 cm³ olarak alınmıştır. Özgül enerji hesaplamaları tüm örnekler için yukarıdaki örnekte olduğu gibi yapılmıştır. Her örnekte iki kesme deneyi yapılarak bunlardan elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 9.3'de verilmektedir.

Çizelge 9.3. Dairesel testere ile doğal taş kesmede gereken özgül enerji değerleri

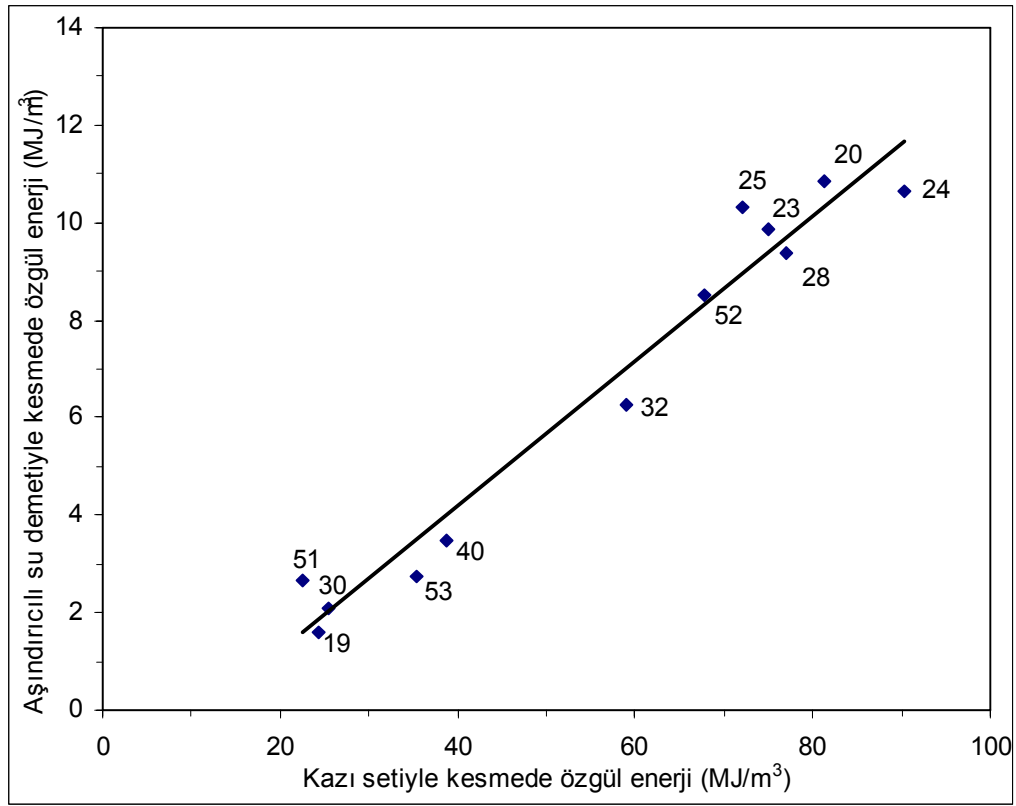
Örnek No	Örnek Adı	Kullanılan ortalama net güç (watt)	Ortalama Özgül Enerji (MJ/m ³)
32	Antalya Limra	0,204	0,444
23	Uşak Yeşil	0,299	0,649
20	Bilecik Bej	0,364	0,792
24	Ege Bordo	0,271	0,589
25	Uşak Beyaz	0,220	0,479
28	Denizli Traverten	0,228	0,495
30	Küfeki Taşı 1	0,118	0,257
52	Emirdağ Traverten	0,283	0,615
51	Küfeki Taşı 2	0,097	0,212
19	Ayazini Tüf	0,092	0,200
53	Beytepe Marn	0,142	0,310
40	Afyon Andezit	0,116	0,253

Dairesel testere ile kesme deneylerinde en düşük özgül enerji değeri Afyon Ayazini tufünde görülürken, en yüksek özgül enerji değeri 20 nolu Bilecik Bej isimli doğal taş örneğinde görülmüştür.

9.4. Farklı Kesme Yöntemlerinde Gereken Özgül Enerji Değerlerinin Karşılaştırılması

Doğal taşların, keski, dairesel testere ve aşındırıcılı su demeti kullanılarak kesilmesinde gereken özgül enerji değerleri hesaplanmış ve birbiriyle karşılaştırılarak aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır.

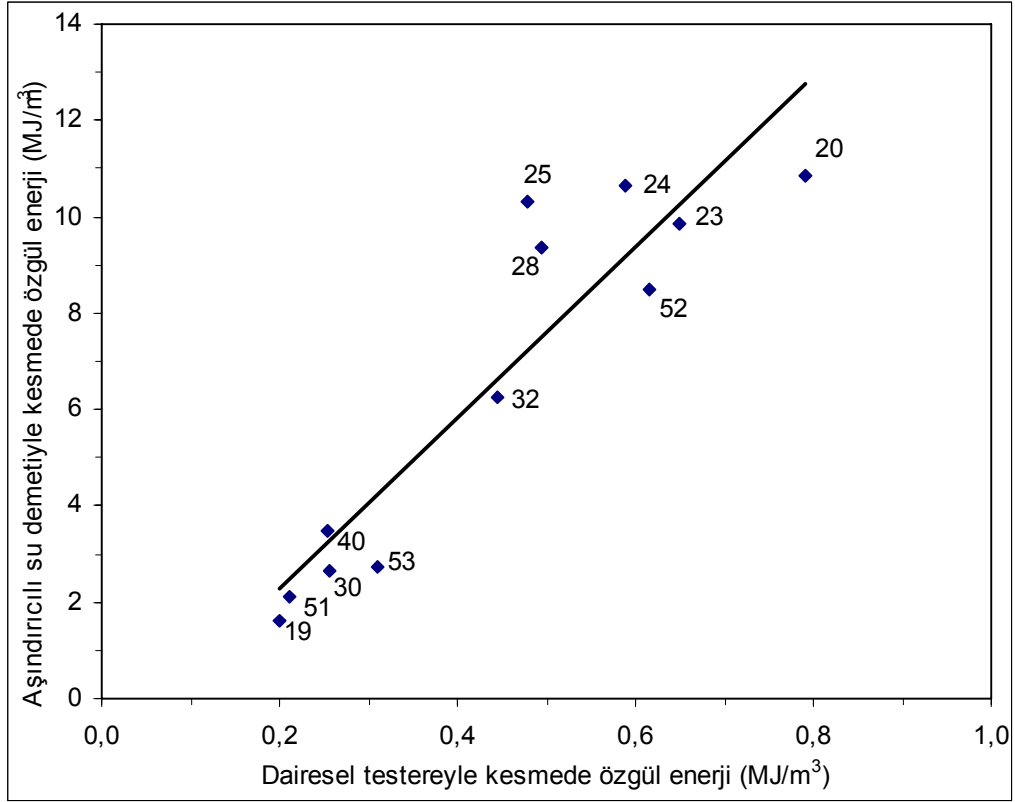
Şekil 9.7'de aşındırıcılı su demetiyle kesim uygulamalarında gerekli özgül enerji değerleriyle küçük boyutlu kazı setiyle yapılan kesme uygulamalarında gereken özgül enerji değerleri arasındaki ilişki grafik şeklinde verilmektedir.



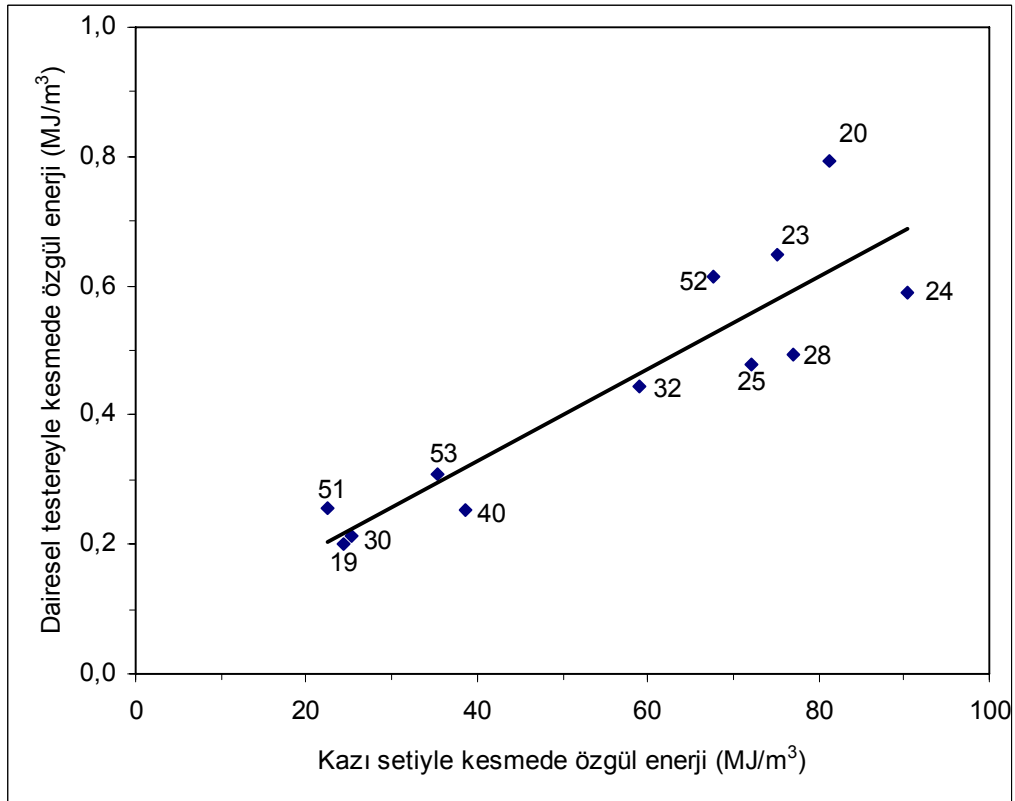
Şekil 9.7. Keski ve su demeti ile kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 9.8'de aşındırıcılı su demetiyle kesim uygulamalarında gerekli özgül enerji değerleriyle dairesel testereyle yapılan kesme uygulamalarında gereken özgül enerji değerleri arasındaki ilişkiler grafik şeklinde verilmektedir.

Şekil 9.9'da ise keski ile yapılan kesim uygulamalarında gerekli özgül enerji değerleriyle dairesel testereyle yapılan kesme uygulamalarında gereken özgül enerji değerleri arasındaki ilişkiler bir grafikte verilmektedir.



Şekil 9.8. Dairesel testere ve aşındırıcılı su demeti ile kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması



Şekil 9.9. Dairesel testere ve kesici uç ile yapılan kesme uygulamalarında gerekli özgül enerji değerlerinin karşılaştırılması

Uygulanan hesaplama yöntemlerinde bazı farklılıklar olmakla birlikte doğal taş kesiminde en düşük özgül enerji gereksinimi dairesel testere ile yapılan kesimde en yüksek özgül enerji gereksinimi küçük boyutlu kazı setiyle kesimde görülmektedir. Aşındırıcılı su demetiyle yapılan kesme işleminde gereken özgül enerji değeri ise bu ikisi arasında yer almaktadır.

Farklı kesme uygulamalarında gereken özgül enerji değerleri incelendiğinde aralarında anlamlı ilişkiler görülmektedir. Kayaçların herhangi bir yöntemle kesilmesi sırasında ölçülecek özgül enerji değeri ile diğer yöntemlerle kesimi sırasında gerekecek özgül enerji değerini kestirmek mümkün olmaktadır.

9.5. Su Demeti Kesme Yönteminin Doğal Taş İşleme Tesislerinde Blok Kesiciler Yerine Kullanılabilirliğinin Ekonomik Değerlendirilmesi

Doğal taş işleme tesislerinde bulunan blok kesme makineleri 2m x 2m x 3m ye varan büyüklükteki doğal taş bloklarından elmas soketli dairesel testerele yardımcıyla 3cm x 30-60cm x serbest boyutlarda plaka kesimi yapan makinelerdir. Bu tip makinelerde en sık kesim yapılan derinlik 30 cm'dir. Kesim yapılırken testerelelerin ucundaki soket kalınlıkları kadar doğal taş kırıntı malzeme olarak atılmaktadır. Bu miktar doğal taş bloğunun yaklaşık %40'ına tekabül etmektedir.

Bu çalışmanın temel konularından biri de su demeti kesme makinelerinin blok kesme makineleri yerine kullanılabilirliğini araştırmaktır. Su demeti kesme makinesinin blok kesme makinesi yerine kullanımı ile blok kayıplarında %30'a varan bir tasarruf elde edilmesi mümkündür. Doğal taşların su demeti ile kesilebilirliğine etki eden temel parametrelerden püskürtme memesi yanal hızı ve pompa basıncı kesme derinliği üzerinde en fazla etkiye sahiptir.

Çalışma kapsamında kullanılan su demeti kesme makinesinde 400 MPa basınca kadar yüksek basınçlarda çalışmak mümkündür. Bu basınçlarda 30 cm derinliğe kadar su demetiyle kesim yapabilmek için püskürtme memesi yanal hızı 2,5 cm/dk gibi çok düşük değerde tutulmalıdır. Blok kesme makinelerinde ise bu değer 20 cm/dk değerine ulaşmaktadır. Doğal taş kesim maliyetleri karşılaştırıldığında aşağıdaki gibi bir durum ortaya çıkmaktadır.

Blok kesme makineleri ile m² doğal taş kesim maliyeti:

Testere maliyeti:	0,16 \$/m ²
Elektrik maliyeti:	0,28 \$/m ²
İşçilik maliyeti:	0,21 \$/m ²
<i>Toplam maliyet:</i>	<i>0,65 \$/m²</i>
Kesim hızı:	600 cm ² /dk = 3,6 m ² /saat

Su demetiyle doğal taş kesim maliyeti (400 MPa basınçlı sistemle):

Aşındırıcı maliyeti:	6 \$/ saat
Orifis+odaklama tüpü maliyeti:	1,5 \$/saat
Elektrik maliyeti:	4,5 \$/saat
İşçilik maliyeti:	2 \$/saat
<i>Toplam maliyet:</i>	<i>14 \$/saat</i>
Kesim hızı:	75 cm ² /dk = 0,5 m ² /saat
<i>m² başına toplam maliyet:</i>	<i>28 \$/m²</i>

Su demetiyle kesme maliyeti bu çalışma kapsamında kullanılan makineler için verilmektedir. Şu anda su demeti kesme makinelerinde 700 MPa basınca kadar yüksek basınçlarda çalışmalar yapılmaktadır. Bu basınçlarda püskürtme memesi çapı daha küçültülmekte ve aşındırıcı beslemesi de çok az yapılmaktadır. Bu çalışmadaki basınç-kesme derinliği ilişkisi düşünüldüğünde saatteki kesim hızı 1 m²'ye çıkmaktadır. Maliyetler karşılaştırıldığında blok kesme makineleri çok avantajlı görülmekle birlikte her m³'lük doğal taş kesimi için blok kesim sisteminde dairesel testerelerin 6 mm'lik soket kalınlığının oluşturacağı kesim aralığı, su demeti kesme sistemindeki 1,2 mm'lik kesim aralığına göre çok yüksektir. Bu sebeple su demeti kesme sisteminin sağlayacağı tasarruf 20 m²/m³'yi bulmaktadır. Bu miktardaki doğal taşın değeri düşünüldüğünde maliyetler birbirini dengelemektedir. Yine de üretim hızı bakımından iyileştirmeye ihtiyaç vardır.

10. SONUÇLAR

Bu çalışmada, bazı Türk mermerleri üzerinde yapılan aşındırıcılı su demeti kesme çalışmalarında, mermerlerin fizikomekanik özellikleri ile makine kesme parametrelerinin mermerlerin kesilebilirlikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Mermerlerin kesilebilirliklerini belirlemek için, püskürtme memesi yanal hızının nispeten düşük tutulduğu koparma kesimlerinde, kesim yüzeylerinin sayısal ifadesi ve çok yüksek püskürtme memesi yanal hızlarında ise su demetinin mermerde ulaştığı derinliğin kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Püskürtme memesi yanal hızının düşük tutulduğu ilk kesme uygulamalarında her mermer örneği kesim sonucunda kopup ayrıldığı için kesilebilirliklerini belirlemenin yöntemi, yüzeydeki su demetinden kaynaklanan izlerin ve yüzeydeki pürüz ve dalgalanmaların sayısal olarak tespiti ve bunların değişiminin ortaya koyulmasıdır. Deneysel çalışmalar sonucunda mermer örneklerinin türüne ve kesme parametrelerdeki değişime bağlı olarak bu sapmaların ve pürüzlülük değerlerinin farklı olduğu tespit edilmiştir.

Püskürtme memesi yanal hızının yüksek seçildiği durumlarda su demeti mermer örneklerinde belirli bir derinliğe ulaşmıştır. Mermer türü ve kesme parametreleri değiştirildiğinde kesme derinliği de değiştiğinden derinlik değeri kesilebilirlik için temel ölçüt olarak kullanılmıştır.

Bu iki farklı durumda elde edilen kesilebilirlik değerleri arasındaki ilişkiler Eşitlik 10.1. ve Eşitlik 10.2'de verilmektedir.

Kesim izlerindeki sapma ile kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 167,25.S^{-0,8219} (R^2 = 0,80) \quad (10.1)$$

Ortalama pürüzlülük değeri (Ra) ile kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 50,392.P^{-0,1888} (R^2 = 0,56) \quad (10.2)$$

Burada ilişki katsayısının düşük olmasının nedeni, pürüzlülük ölçüm cihazında makro yerine mikro pürüzlülük ölçümlerinin yapılmasından kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır.

Bazı Türk mermerleri üzerinde yapılan aşındırıcılı su demeti kesme çalışmalarında, önceki çalışmalardan farklı olarak, mermer örneklerinin fizikomekanik özellikleri ile su demeti kesme derinlikleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve Eşitlik 10.3., 10.4., 10.5., 10.6., 10.7., 10.8., 10.9., 10.10., 10.11. ve 10.12'deki gibi belirlenmiştir.

Birim hacim ağırlığı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = -107,1.BHA + 312,54 \quad (R^2 = 0,84) \quad (10.3)$$

Su emme ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 8,5255.SE + 21,592 \quad (R^2 = 0,91) \quad (10.4)$$

Görünür gözeneklilik ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 4,9351.GG + 20,035 \quad (R^2 = 0,86) \quad (10.5)$$

Shore sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 7351.H_s^{-1,4219} \quad (R^2 = 0,92) \quad (10.6)$$

Koni delici sertliği ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 105,92.H_k^{-1,0046} \quad (R^2 = 0,62) \quad (10.7)$$

Az örnekle çalışıldığından ilişki yeterli bulunamamıştır.

Kristal tane büyüklüğü ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = -0,0036.KTB + 27,63 \quad (R^2 = 0,21) \quad (10.8)$$

Böhme yüzey aşınma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 9,8198.e^{0,0784B} \quad (R^2 = 0,71) \quad (10.9)$$

Kullanılan aşındırıcıda değişme olduğundan ilişkide bir miktar düşüş olmuştur.

Tek eksenli basma dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 906,42.\sigma_c^{-0,8001} \quad (R^2 = 0,50) \quad (10.10)$$

Elastisite modülü ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 203,46.E^{-0,7495} (R^2 = 0,56) \quad (10.11)$$

Çekme dayanımı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 144,89.\sigma_t^{-0,8918} (R^2 = 0,54) \quad (10.12)$$

Su demeti kesme derinliği ile mermerlerin yapısal özellikleri arasındaki ilişkiler incelendiğinde en yüksek korelasyon katsayısı veren ilişkiler mermerlerin sertliği, birim hacim ağırlığı, gözenekliliği, su emme miktarı ve Böhme yüzey aşınma dayanımı ile kesme derinliği arasında görülmektedir.

Yapılan uygulamalarda kesme parametrelerinin bazı mermerlerin kesilebilirliğine etkisi de incelenmiştir ve Eşitlik 10.13., 10.14., 10.15. ve 10.16'daki gibi ilişkiler belirlenmiştir.

Püskürtme memesi yanal hızı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 2390,2.V_n^{-0,6548} (R^2 = 0,99) \quad (10.13)$$

Aşındırıcı debisi ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 8,6907.M_a^{0,187} (R^2 = 0,97) \quad (10.14)$$

Pompa basıncı ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 0,2859.P_p^{0,5678} (R^2 = 0,99) \quad (10.15)$$

Püskürtme memesi-doğal taş arası mesafe ile su demeti kesme derinliği arasındaki ilişki:

$$h = 38,725.X^{-0,2113} (R^2 = 0,98) \quad (10.16)$$

Kesme derinliği artan pompa basıncı ve aşındırıcı debisi ile artarken, püskürtme memesi yanal hızının ve püskürtme memesi-mermer arası mesafenin artmasıyla azalmaktadır.

Bu araştırmada, su demetiyle kesme uygulamalarında kesme derinliğine doğal taş özelliklerinin ve kesme parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Bu amaçla doğal taş

örneklerinin Shore sertliği ile kesme derinliği üzerinde en çok etkili olan kesme parametrelerinden püskürtme memesi yanal hızı, pompa basıncı, aşındırıcı besleme miktarı bağımsız değişkenler; oluşan kesme derinliği ise bağımlı değişken olarak seçilmiştir. Daha sonra SPSS 9.0 istatistik programı kullanılarak doğrusal olmayan regresyon analizi uygulanmıştır. Analizde önce regresyon modeli oluşturulmuş ve modeldeki parametreler, program yardımıyla gerçek değerler ile modelle hesaplanan değerler arasında en yüksek korelasyon oluşana kadar iterasyon yapılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan doğal taşlar için kesme derinliğinin %95 güven aralığında hesaplanmasında önerilen model Eşitlik 10.17'de verilmiştir.

$$h = 9809 \times \frac{P_p^{0,6049} \times M_a^{0,1860}}{V_n^{0,7216} \times H_s^{1,4683}} \quad (10.17)$$

Araştırma kapsamında, doğal taşlar ayrı ayrı kesme derinliği modelinin oluşturulmasında kullanıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilmektedir:

Kristalin mermerler için:

$$h = 93.514 \times \frac{P_p^{0,6945} \times M_a^{0,5008}}{V_n^{1,4186} \times H_s^{1,4833}} \quad (10.18)$$

Kireçtaşları için:

$$h = 1340 \times \frac{P_p^{0,4792} \times M_a^{-0,0156}}{V_n^{0,1337} \times H_s^{1,4537}} \quad (10.19)$$

Diğer yumuşak doğal taşlar için:

$$h = 3333 \times \frac{P_p^{0,5804} \times M_a^{0,0423}}{V_n^{0,4059} \times H_s^{1,4696}} \quad (10.20)$$

Bazı mermerlerin su demetiyle kesimi uygulamalarında ayrıca kesimde gereken özgül enerji değerleri hesaplanmıştır. Su demetiyle kesimde özgül enerji değerleri kullanılan örnekler için yaklaşık 1-10 MJ/m³ arasında tespit edilmiştir. Su demetiyle kesime ek olarak küçük boyutlu kazı setiyle ve dairesel testereyle kesimdeki gerekli özgül enerji değerleri de belirlenmiştir. Bulunan özgül enerji

değerleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve Eşitlik 10.21., 10.22., 10.23'deki gibi belirlenmiştir.

Su demeti-kazı seti ile kesimde gereken özgül enerji değeri arasındaki ilişki:

$$y = 0,1479.x^{1,7135} (R^2 = 0,96) \quad (10.21)$$

Su demeti- dairesel testere ile kesimde gereken özgül enerji değeri arasındaki ilişki:

$$y = 17,704.x^{-1,2786} (R^2 = 0,85) \quad (10.22)$$

Dairesel testere-kazı seti ile kesimde gereken özgül enerji değeri arasındaki ilişki:

$$y = 0,0071.x + 0,0449 (R^2 = 0,82) \quad (10.23)$$

şeklinde bulunmuştur.

11. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Yapılan aşındırıcılı su demeti kesme çalışmalarında, mermerlerin fizikomekanik özelliklerinden sertliği, birim hacim ağırlığı ve aşınma dayanımının kesilebilirlikte en fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür. Literatürde, saf su demeti ile yapılan kazı-kesme çalışmalarında kayaçların çekme dayanımı ve mineral tane boyu gibi özelliklerinin kesmede etkisi olduğu ifade edilmesine rağmen aşındırıcılı su demeti ile kesmede böyle bir durum gözlenmemiştir. Bunun sebebi her iki durumda meydana gelen farklı kesme mekanizmasıdır. Saf su demeti ile yapılan kazı-kesme çalışmalarında kesme işlemi suyun kayacı oluşturan mineral sınırlarına girmesi ve burada oluşan su basıncı ile tanelerin kopup birbirinden ayrılması şeklinde olmaktadır. Aşındırıcılı su demetinde ise kesme işlemi aşındırıcı tanelerin kayaç yüzeyinden yonga koparması ile gerçekleşmektedir.

Bu işlemi en iyi yansıtan deneylerden biri de Böhme yüzey aşınma dayanımı deneyidir. Bu deneyde aşındırıcılı su demetinde olduğu gibi serbest aşındırıcı taneler, kayaç yüzeyinden yonga kopararak aşındırma yapmaktadır. Deney sonuçları ile kesme derinliği arasında pozitif bir ilişki bulunmuştur.

Aşındırıcılı su demetiyle kesme işleminde kesme işlemi yapan aşındırıcı taneler kayaç yüzeyine sürtünerek aşındırma işlemi (erozyon) yaptıklarından burada aşındırıcı tanenin ve kayacın sertliğinin birbirine oranı önem kazanmaktadır. Kullanılan aşındırıcı değişmediğinden kayacın sertliğinin artması bu oranı düşürerek kesme işlemi zorlaştırmakta ve kesme derinliğini düşürmektedir. Ayrıca erozyon işlemi gerçekleştiren aşındırıcı taneler hızları ve büyüklükleriyle orantılı olarak bir momentuma sahiptirler. Bu taneler kayaç yüzeyinden yonga koparıken momentumun korunumu gereği daha az birim hacim ağırlığa sahip kayaçlardan daha fazla hacimde yonga koparacaklarından bu kayaçlarda kesme derinliği de yüksek çıkmaktadır. Bu sebeple birim hacim ağırlığı ile kesme derinliği arasında negatif bir ilişki mevcuttur.

Yapılan aşındırıcılı su demeti kesme çalışmalarında, kesme parametrelerinden; püskürtme memesi yanal hızı, pompa basıncı, aşındırıcı besleme miktarı ve püskürtme memesi-kayaç arası mesafenin kesme derinliğine olan etkisi

araştırılmış ve en fazla etkiye sahip olan parametrenin püskürtme memesi yanal hızı olduğu sonucuna varılmıştır.

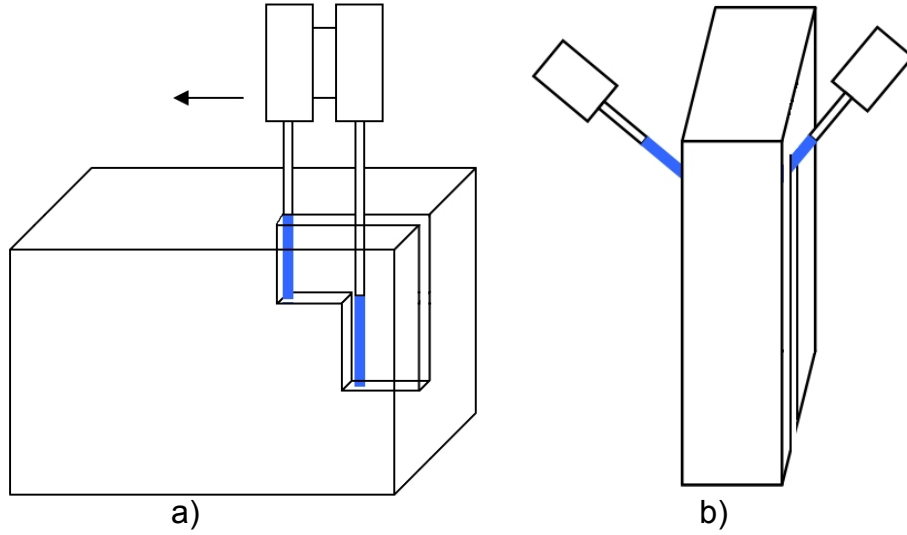
Farklı gruptaki mermer örnekleri için kesme derinliği kayacın yapısal özelliklerinden daha fazla etkilenirken aynı gruptaki mermerler için (örneğin gerçek mermerler grubu, tuf grubu gibi) kesme derinliği mermerlerin yapısal özelliklerinden çok kesme parametrelerinden etkilenmektedir. Özellikle püskürtme memesi yanal hızındaki farklar kesme derinliği üzerinde çok fazla değişim yaratmaktadır.

Mermer yüzeylerinde yapılan pürüzlülük ölçümlerinde kesme derinliği boyunca mikro pürüzlülük ölçümleri yapılmış ve mikro pürüzlülüğün de kesme derinliğinin artışıyla arttığı tespit edilmiştir. Su demetinin içindeki aşındırıcı tanelerin oluşturduğu kesme yarıkları mikro pürüzlülüğü oluşturmaktadır. Kayaçtaki derinlik arttıkça tanelerin kesme iz derinliğinin artması literatürde bahsedildiği gibi kesme mekanizmasının değişmesi teorisinden ziyade demetin bükülmesi sonucu aşındırıcı tanelerin temas açısının artmasıyla yonga oluşumunun daha verimli gelişmesi yaklaşımı ile daha iyi izah edilebilir.

Aşındırıcılı su demeti kesim uygulamalarında belirlenen özgül enerji değerleri ile küçük boyutlu kesme deney seti ve dairesel testere ile kesme uygulamalarında belirlenen özgül enerji değerleri arasında yüksek ilişkiler tespit edilmiştir. Her üç durumda da bir kesici ucun kayaçtan yonga koparması işlemi mevcuttur. Dairesel testere ve aşındırıcılı su demetinde kesme işlemi yapan asıl unsur yani kesici uç mikro ölçekte aşındırıcı tanelerdir. Aşındırıcılı su demetinde granat aşındırıcı malzeme iken dairesel testerede elmas aşındırıcı malzemedir. Küçük ölçekli kesme deney setinde ise kesici uç standard keskidir. Kesme mekanizması temelde çok benzer olmakla birlikte sadece ölçekte farklılık bulunmaktadır. Bu nedenle dairesel testere veya aşındırıcılı su demetiyle kesimde sertlik gibi mikro özellikler önemli olurken kesme deney setinde dayanım gibi makro özellikler de önem kazanır.

Mermer işleme tesislerindeki dairesel testereli bazı kesme makineleri yerine su demeti kesme makinesinin kullanımı değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan aşındırıcılı su demeti kesme makinesi pratikte en fazla 5 cm kalınlığında

malzemeleri kesip işlemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada 30 cm kalınlığında mermerin kesme parametrelerinin uygun seçilmesi durumunda aşındırıcılı su demetiyle kesilebilmesinin mümkün olabileceği görülmüştür. Fakat sistem bugünkü şekliyle kalınlığı az malzemelerin kesilmesi için geliştirildiğinden püskürtme memesi yapısı ve makine dizaynı kalın kesimler için uygun gözükmemektedir. Pompa basınçları daha yüksek sistemlerin ve yapılacak kesim uygulamalarına göre dizayn edilmiş püskürtme memelerinin (su demetinin doğrusallığını geliştiren veya daha ince ve uzun) kullanılmasıyla istenen hızda ve derinlikte kesim yapılması mümkün olacaktır. Bu bağlamda, su demetli kesme makinesinde aşağıda verilen sistemler önerilmektedir (Şekil 11.1).



Şekil 11.1. Su demeti kesimine alternatif yaklaşımlar

İki püskürtme memesinin ardışık monte edilerek kademeli kesim yapılması (Şekil 11.1.a) veya kayacın önceden monolama ile 30cm kalınlıkta kesildikten sonra Şekil 11.1.b'deki gibi iki püskürtme memesinin karşılıklı olarak aynı doğrultuda çalıştırılmasıyla plaka kesilmesi önerilen kesme sistemi tasarımlarıdır. Teleskobik püskürtme memeli su demeti sistemi tasarımı da bir diğer öneri olup, deneysel çalışmalarının yapılması da önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Agus, M., Bortolussi, A., Ciccu, R., Kim W.M., 1995, Abrasive performance in rock cutting with AWJ and ASJ, In: Labus T J (ed), Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp 31-48.
- Akçın N.A., 1986, Türkiye Taşkömürü Kurumu Armutçuk Taşkömürü İşletme Müessesesi yeraltı ocaklarında yüksek basınçlı su jetleriyle kömür kazısının araştırılması ve uygulanabilirliği, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, s 1-30.
- Akkurt, A., 2002, Çeşitli malzemelerinin aşındırıcılı su jeti ile kesilmesinde yüzey özellikleri, sertlik ve mikroyapı değişimlerinin farklı kesme yöntemleriyle karşılaştırılması olarak incelenmesi, Doktora tezi, Gazi Üniv. Fen Bil. Enst., Ankara.
- Arola, D. and Ramulu, M., 1993, Mechanisms of material removal in abrasive waterjet machining of common aerospace materials, In: Hashish M. (ed) 1993, Proc. 7th Amer. Water Jet Conf., Vol. 1, Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp 43-64.
- Babu, A.R., Babu, N.R. and Chakravarthy, P.S., 1998, A fuzzy based approach for selection of process parameters in abrasive waterjet cutting of black granite, 5th Pacific Rim International Conference on Water Jet Technology, New Delhi, India.
- Bahadur, S. and Badruddin, R., 1990, Erodent particle characteristics and the effect of particle size and shape on erosion. *Wear*, 158, 189-208.
- Balcı, C. ve Bilgin, N., 2005, Mekanize kazı makinelerinin seçiminde küçük ve tam boyutlu kazı deneylerinin karşılaştırılması, *İTÜ Dergisi/Mühendislik*, Cilt 4, Sayı 3, Haziran 2005, s76-86.
- Barton, R.E., 1982, A safe method of cutting steel and rock, In: Stephens, H.S., Davies, E.B. (eds) Proc. 6th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp 503-518.
- Bilgin, N., 1989, İnşaat ve maden mühendisleri için uygulamalı kazı mekaniği, Birsen Yayınevi, ISBN 975-511-010-0, İstanbul, 192s.
- Bitter, J.G.A., 1963, A study of erosion phenomena, part I,II, *Wear*, 6, pp 5-21, 169-190.
- Blickwedel, H., 1990, Erzeugung und Wirkung von Hockdruck-Abrasivstrahlen, *VDI Fortschritt-Berichte, Reihe, 2*, 206.
- Bortolussi, A., Yazıcı, S. and Summers, D.A., 1988, The use of waterjets in cutting granite, 9th International Symposium on Jet Cutting Technology Sendai, Japan, pp E3.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Brandt, C., Lois, H., Meier, G., and Tebbing, G., 1994, Abrasive suspension jets at working pressures up to 200 MPa, In: Allen A.G: (ed) Jet Cutting Techn., Mech. Engng. Publ. Ltd., London, pp 489-509.
- Brandt, S., Maros, Z. and Monno, M., 2000, AWJ parameter selection –A technical and economical evaluation, 15th International Conference on Jetting Technology, London, Professional Engineering Publishing Ltd., pp 353-366.
- Brook, N. and Summers, D.A., 1969, The penetration of rock by high speed water jets, Int. J. of Rock Mech. And Min. Sci., Vol. 6, pp 249-258.
- Buijs, M., 1994, Erosion of glass as modeled by indentation theory, J. Amer. Ceram. Soc., 77, pp 1676-1678.
- Chen, W.L. and Geskin, E.S., 1991, Measurements of the velocity of abrasive waterjet by the use of Laser Transit Anemometer, In: Saunders D. (ed), Jet Cutting Technol., Elsevier Sci. Publ., London, pp 23-36.
- Chen, F.L., Siores, E. and Patel, K., 2002, Improving the cut surface qualities using different controlled nozzle oscilation techniques, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42, pp 717-722.
- Chermensky, G.P., 1976, Breaking coal and rock with pulsed water jets, Proc. 3rd. Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, D4, pp 17.
- Chung, Y., Geskin, E.S. and Singh, P., 1992, Prediction of the geometry of the kerf created in the course of abrasive waterjet machining of ductile materials, In: Lichtarowicz A. (ed) Jet Cutting Techn., Kluwer Acad. Press, Dordrecht, pp 525-541.
- Cooley, W.C., 1972, Rock breakage by pulsed high pressure water jets, Proc. 1st Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, B7, pp 101-112.
- Crow, S.C., 1973, A theory of hysulic rock cutting,. Int. J. of Rock Mech. And Min. Sci., Vol 10, pp 567-584.
- Draughon, R.N., 1981, Overview of waterjet applications in manufacturating, Proc. of 1st Water Jet Conference, Golden Colorado.
- Edny, B., 1976, Experimental studies of pulsed water jets, Pro. 3rd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, B2, pp 11-26.
- Ellermaa, R.R., 1993, Erosion prediction of pure metals and carbon steels, Wear, 162-164, pp 1114-1122.
- Engin, İ.C., 2006, Ocak işletmeciliğinde ve dekoratif mermer üretiminde su jeti kullanımı, Türkiye V. Mermer ve Doğal taş Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 393-405.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Etchells, P., 1997, Cutting head design powers abrasive waterjet cutting costs, aircraft engineering and aerospace technology, Volume 69, No 2, pp 147-150.
- Evans, A.G., Gulden, M.E. and Rosenblatt, M.E., 1976, Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A., 361, pp 343-356.
- Fairhurst, R.M., Heron, R.A. and Saunders, D.H., 1986, 'Diajet' – a new abrasive water jet cutting technique. In: Saunders D. (ed) Proc. 8th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp 395-402.
- Fairhurst, C.E. and Deliac, E.P., 1986, Water-jet assisted rock cutting- the effect of pick traverse speed, in Proceedings 8th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA: London).
- 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.
- Finnie, I., 1958, The mechanism of erosion of ductile metals, In: Haythornthwaite R.M., et al. (eds), Proc. 3rd U.S. Nat. Congr. Appl. Mech., ASME, New York, pp 527-532.
- Foldyna, J. and Fialova, V., 1989, Moznost vyzity nekterych tezkych mineralu pro generovani abrazivniho vodniho paprsku, In: Rakowski Z., (ed) 1989 Proc. Conf. Mining Geomech, Vol 2, Dom Technika, Ostrava, pp 389-399.
- Fowell, R.J., Anderson, I. and Waggott, A., 1988, Investigation into the dynamic rock cutting characteristics of boom tunneling machines, in Proceedings 29th US Symposium Rock Mechanics, University of Minnesota, (Balkema: Rotterdam).
- Frank, N.J., 1981, Hydraulic mining and fragmentation research in the United States, Proc. of 1st Water Jet Conference, Golden Colorado.
- Galecki, G., Mazurkiewicz, M. and Jordan, R., 1987, Abrasive grains disintegration effect during jet ejection. In: Wang F.D. (ed), Proc. Int Water Jet Symp. Beijing, pp 4/71-4/77.
- Geren, N. ve Tunç, T., 2001, Yapısal farklılıklar içeren su jeti kesme sistemlerinin en uygununun belirlenmesi, Mühendis ve Makine, Sayı 500, cilt 42, Eylül 2001. s 42-49.
- Guo, N.S., Louis, H., Meier, G., and Ohlsen, J., 1992, Recycling capability of abrasives in abrasive water jet cutting. In: Lichtarowicz A., Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp 503-523.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Guo, N.S., Louis, H., Meier, G., and Ohlsen, J., 1994, Abrasive water jet cutting – Methods to calculate cutting efficiency. In: Rakowski z (ed) Geomechanics 93, A.A. Balkema, Rotterdam, pp 291-299.
- Guo, N.S., 1994, Schneidprozeß und schnittqualität beim wasserabrasivstrahl-schneiden, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 2, 328.
- Hagan, P.C., 1992, The Cuttability of rock using a high pressure water jet, Proceedings of Western Australia Conference on Mining Geomechanics, June, 1992.
- Handewith, H.J., Evans, R.J., and Thimons, E.D., 1985, An overview of water jet assisted rock cutting at pittsburg research center, Proceedings of the 3rd U.S. Water jet Conference, Third U.S. Water Jet Conference, May 21-23, 1985, Pittsburgh.
- Harben, P., 1978, Abrasives-taking the rough with the smooth, Industrial Minerals, November, pp 49-73.
- Hashish, M. and Plessis, M.P., 1978, The application of a generalized jet cutting equation, Proc. 4th Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, B1, 12.
- Hashish, M. and Plessis, M.P., 1979, Prediction equations relating high velocity jet cutting performance to stand off distance and multipasses, J. of Engng. for Industry, Vol. 101, pp 311-318.
- Hashish, M. and Plessis, M.P., 1981, Theoretical and experimental investigation of continuous jet penetration of solids, Trans. ASME, J. Engng. Ind., Vol. 100, pp 84-88.
- Hashish, M., Loscutoff, W.V. and Reich, P., 1983, Proc. of the 2nd U.S. Water Jet Conference, Rolla, Missouri.
- Hashish, M., 1984, A model study of metal cutting with abrasive water jets, ASME J. Engng. Mat. and Techn., 106, pp 88-100.
- Hashish, M., 1987, An improved model for erosion by solid particle impact, In: Field J.E., Dear J.P. (eds) Proc. 7th Int. Conf. Erosion by Liquid and Solid Impact, Cavendish Lab., Cambridge, pp 66.1-66.9.
- Hashish, M., 1988, Visualization of the abrasive waterjet cutting process, Exp. Mechan., 28, pp 159-169.
- Hashish, M., 1991, Cutting with high-pressure abrasive suspension jets, In: Labus T.J. (ed), Proceed 6th Amer. Water Jet Conf. Water Jet Tehn. Ass. St. Louis, pp 439-455.
- Hashish, M., 1993, Prediction models for AWJ machining operations, Proceedings of the 7th American Waterjet Conference, Seattle, WA, USA, pp 175-190.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Hashish M., Steele D.E. and Bothell D.H., 1996, Machining with super-pressure (690MPa) waterjets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No 4, pp 465- 479.
- Heincker, W.R., Eck, R.S., Summers, D.A. and Lehnhoff, F., 1976, A hydraulic longwall mining design concept for the future, *World Coal*, pp 23-26.
- Hood, M., 1975, Water jet assisted drag-bit cutting of hard rock, *Research Review* (Chamber of Mines of South Africa: Johannesburg).
- Hood, M, Li, X, Salditt, P. and Knight, G., 1991, An advanced system for rock tunnelling-results from a field experiment, in *Proceedings 6th American Water Jet Conference* (Water Jet Tech. Assoc.).
- Hollinger, R.H. and Mannheimer, M., 1991, Rheological investigation of the abrasive suspension jet, In: Labus T.J. (ed) 1991, *Proc. 6th American Water Jet Conf.*, Water Jet Techn. Ass., St Louis, pp 515-528.
- Horii, K., Matsumae, Y., and Chen, X., 1991, Development of a new mixing nozzle assembly for high pressure abrasive water jet applications, In: Saunders D. (ed), *Jet Cutting Techn.*, Elsevier Sci. Publ., London, pp 69-72.
- Hoshino, K., Nagano, T., Takagi, K., Narita, Y. and Sato, M., 1976, The development and experiment of the water jet drill for tunnel construction, *Proc. 3rd Int. Symp. on Jet Cut. Tech.*, Chicago, E4, pp 8.
- Hutchings, I.M., 1979, Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals, In: Levy A.V. (ed) *Proc. Corrosion/Erosion of Coal Convers. Syst. Mat. Conf.*, Nat. Ass. Corr. Engrs., Houston, pp 393-428.
- Iihoshi, S., Nakao, K., and Torii, K., 1986, Preliminary study on abrasive waterjet assist roadheader, In: Saunders, D., (ed) 1986, *Proc. 8th Int. Symp. Jet Cutting Techn.*, BHRA Fluid Engng, Cranfield, pp 71-77.
- ISRM, 1981, *ISRM Rock characterization testing and monitoring; Suggested Methods*, Oxford, pp 16.
- Kalpakjian, S., 1995, *Manufacturing engineering and technology*, Addison Wesley, USA.
- Kovacevic, R., 1992, Monitoring the depth of abrasive waterjet penetration, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, 32, pp 725-736.
- Kovacevic, R., Wang, L. and Zhang, Y.M., 1994, Identification of abrasive waterjet nozzle wear based on parametric spectrum estimation of acoustic signals, *Proc. Inst. Mech. Engrs., J. of Engng. Manuf.*, 208, 173-181.
- Kulaksız, S., 2005, Doğal taş (mermer) maden işletmeciliği ve işleme teknolojileri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, Ankara.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Külekcı, M.K., 2002, Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol 44, September 2002, pp 1297-1306.
- Lauand, C.T., Martin, G.R., Hennies, W.T. and Ciccu, R., 2000, Rock technological parameters useful to water jet cutting systems, *Mine Planning and Equipment Selection*, Panagiotou & Michalakopoulos, Balkema, Rotterdam, 2000, pp 625-630.
- Leach, S.J. and Walker, G.I., 1966, Some aspects of rock cutting by high speed water jets, *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A* 260, 295-303.
- Liu, B.L. and Cui, M.S., 1988, Experiments in the premixed abrasive jet to cut metal plates, In: Woods P.A. (ed) *Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Techn.*, BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp 85-98.
- Liu, B., 1991, The rotated injection abrasive jet rust cleaning system, In: Saunders D. (ed), *Jet Cutting Techn.*, Elsevier Sci. Publ., London, pp 221-233.
- Liu, B.L., Shang, Y., and Yao, H., 1992, The recent premajet advance in cutting and derusting technology. In: Lichtarowicz A. (ed) *Jet Cutting Technol.*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp 451-460.
- Marshall, D.B., Lawn, B.R. and Evans, A.G., 1982, Elastic/plastic indentation damage in ceramics: lateral crack system. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 65, pp 561-566.
- Martinec, P., 1992, Mineralogical properties of abrasive materials and their role in water jet cutting process, In: Rakowski Z. (ed) *Geomechanics 91*, A.A. Balkema, Rotterdam, pp 353-382.
- Martinec, P., 1994, Changes of garnet during abrasive water jet generation and cutting of materials, In: Allen N.G. (ed), *Jet Cutting Technol, Mech. Engng. Publ. Ltd., Lodon*, pp 543-551.
- Matsui, S., Matsumura, H. and Ikemoto, Y., Kumon, Y. and Shimizu, H., 1991, Prediction equations for depth of cut made by abrasive water jet, In: Labus T J (ed), *Proc. 6th Amer. Water Jet Conf.*, Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp 31-41.
- Maurer, W.C., Heilhecker, J.K. and Love, W.W., 1974, High-Pressure Drilling, *Proc. 2nd Int. Symp. on Jet Cut. Tech.*, Cambridge, pp X80-X89.
- Mazurkiewicz, M., Fincuan, L. and Ferguson, R., 1988, Investigation of abrasive cutting head internal parameters., In: Woods P.A. (ed), *Proc. 9th Int. Symp. Jet Cutting Techn.*, BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp 75-84.
- Mellor, M., 1972, Some general relationships for idealized jet cutting, *Proc. 1st Symp. on Jet Cut. Tech.*, Coventry, A2, pp 12.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Meng, H.C. and Ludema, K.C., 1995, Wear models and prediction equations: their form and content, *Wear*, 181-183, pp 443-457.
- Miranda R.M. and Quintino L., 2005, Microstructural study of material removal mechanisms observed in abrasive waterjet cutting of calcareous stones, *Materials Characterization*, 54 (2005) pp. 370– 377.
- Momber, A.W. and Kovacevic, R., 1994, Calculation of exit jet energy in abrasive water jet cutting, *PED*, 68-1, pp 361-366.
- Momber, A.W., 1995, A generalized abrasive water jet cutting model, In: Labus T.J. (ed), *Proc. 8th Amer. Water Jet Conf., Vol 1, Water Jet Techn. Ass., St. Louis*, pp 359-371.
- Momber, A. and Kovacevic, R., 1995, Energy dissipative processes in high speed water-solid particle erosion, In Hoy J. W., et al. (eds), 1995, *Proc. ASME Heat Transfer and Fluid Engng. Div., ASME, New York*, pp 243-356.
- Momber, A.W., Eusch, I. and Kovacevic, R., 1996, Machining refractory ceramics with abrasive water jet *J. of Mater. Sci.*, 31, pp 6485-6493.
- Momber, A.W. and Kovacevic, R., 1997, Test parameter analysis in abrasive water jet cutting of rocklike materials, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 34, No 1, pp 17-25.
- Momber, A.W., 1998, The kinetic energy of wear particles generated by abrasive-water-jet erosion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 83, pp 121-126.
- Momber, A.W. and Kovecevic, R., 1998, Principles of abrasive water-jet machining, Springer-Verlag, London, pp 23-25.
- Momber, A.W., 2001, Energy transfer during the mixing of air and solid particles into a high speed waterjet: an impact-force study, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 25, pp 31-41.
- Moodie, K. and Taylor, G., 1974, The fracturing of rocks by pulsed water jets, *Proc. 2nd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambrige*, H7, pp 12.
- Moodie, K., 1976, Coal Ploughing Assisted with high-pressure water jets, *Proc. 3rd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago*, D6, pp 15.
- Morris, C.J. and MacAndrew, K.M., 1986, A laboratory study of high pressure jet assisted cutting, in *Proceedings 8th International Symposium on Jet Cutting Technology (BHRA: London)*.
- Nagano, T., Hoshino, K. and Narita, Y., 1974, The development of a water jet drilling machine, *Proc. 2nd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambrige*, E1, pp 10.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Nagano, T., Takagi, K., Narita, Y. and Sato, M., 1978, Development of water jet drifter, Proc. 4th Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, C6, pp 9.
- Nakamura, H., Nazaraki, T. and Yanagihara, S., 1989, Cutting technique and system for biological shield, Nuclear Technol., 86, pp 168-178.
- Nanduri, M, Taggart, D.G., Kim, T.J., Ness, E. and Risk, E., 1995, Effect of offset bores on the performance and life of abrasive waterjet mixing tubes, In: Labus T.J. (ed) Proc 8th Amer. Water Jet Conf., Vol 2, Water Jet Techn. Ass., St Louis, pp459-470.
- Nebeker E.B., 1983, Standoff distance improvement using percussive jets, 2nd U.S. Water Jet Conference, Rolla, Missouri, May, 1983.
- Neusen, K.F., Gores, T.J. and Labus, T.J., 1992, Measurement of particle and drop velocities in a mixed abrasive waterjet using a forward-scatter LDV system. In: Lichtarowicz A (ed), Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp 63-74.
- Neusen, K.F., Gores, T.J. and Amano, R.S., 1994, Axial variation of particle and drop velocities downstream from an abrasive water jet mixing tube, In: Allen N.G. (ed), Jet Cutting Techn., Mechan. Engng. Publ. Ltd., London, pp 93-103.
- Nikonov, G.P. and Goldin, Y.A., 1972, Coal and rock penetration by fine continuous high pressure water jets, Proc. 1st Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Coventry, E2, pp 16.
- Oweinah, H., 1989, Leistungssteigerung des hochdruck durch zugabe von zusatzstoffen, PhD Thesis, TU, Darmstadt.
- Ramulu, M. and Arola, D., 1994, The influence of abrasive water jet cutting conditions on the surface quality of graphite/epoxy laminates, Int. J. Mach. Tools Manuf., 34, pp 295-313.
- Ritter, J.E., 1985, Erosion damage in structural ceramics, Mater. Sci. And Engng., 71, pp 194-201.
- Sheldon, G.L. and Finnie, I., 1966, The mechanism of material removal in the erosive cutting of brittle materials, ASME J. Engng. Ind. 88, pp 393-400.
- Shimizu, S., 1996, Effects of nozzle shape on structure and drilling capacity of premixed abrasive water jets. In: Gee C. (ed), Jetting Techn., Mech. Engng. Publ. Ltd., London, pp 13-26.
- Simpson, M., 1990, Abrasive particle study in high pressure water jet cutting, Int. J. Water Jet Tech., 1, pp 17-28.
- Singh, P.J., 1991, Some recent advances in waterjet cutting technology, Waterjet Cutting Systems, SME Conference, Schaumburg, IL, USA:

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- Summers, D.A., 1971, Waterjet coal mining related to the mining environment, Conference on Underground Mining Environment, Rolla, Missouri.
- Summers, D.A., 1972, Water jet cutting related to Jet & rock properties, 14. Rock Mechanics Symposium, June, 1972, ASCE, pp. 569-588.
- Summers, D.A. and Peters, J.F., 1974, Preliminary experimentation on coal cutting in the pressure range 35 to 200 MN/m², Proc. 2nd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Cambridge, H7, pp 11.
- Summers, D.A. and Mazurkiewicz, M., 1976, The effect of jet traverse velocity on the cutting of coal and jet structure, Proc. 3rd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, D5, pp 15.
- Summers, D.A. and Bushnell, D.J., 1976, Preliminary experimentation of the design of the the water jet drilling device, Proc. 3rd Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Chicago, E2, pp 8.
- Summers, D.A., 1978, The Use of high pressure waterjets in the mining industry, Colliery Guardian, October, 1978.
- Summers, D.A., Lehnhoff, T.F. and Weakly, L.A., 1978, The development of a water jet drilling system and preliminary evaluations of its performance in a stress situations underground, Proc. 4th Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, C4, pp 9.
- Summers, D.A. and Yazıcı, S., 1989, Progress in rock drilling, Article for Mechanical Engineering.
- Swanson, R.K., Kilman, M., Cerwin, S. and Tarver, W., 1987, Study of particle velocities in water driven abrasive jet cutting, Proceedings of Fourth U.S. Water Jet Conference, 1987, University of California, Berkeley, The American Society of Mechanical Engineers, pp 163-171.
- Taggart, D.G., Nanduri, M. and Kim, T.J., 2001, The effects of system and geometric parameters on abrasive water jet nozzle wear, International Journal of Machine Tools and Manufacturing, vol 42, April 2002, pp615-623.
- Taylor, C.D. and Thimmons, E.D., 1989, Water-jet-assist improves shearer performance, Eng and Min J, pp 37-53.
- Taylor, C.D., Thimmons, E.D. and Kovscek, P.D. 1989, Evaluation of water jet assisted cutting capability on longwall shearers, USBM Report RI-9270.
- Tazibt, A., Parsy, F. and Abriak, N., 1996, Theoretical analysis of the particle aceleration process in abrasive water jet cutting, Computational Materials Science, 5, pp 243-254.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

- 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.
- Trumpf, 1997, Technical information: water jet cutting , Technical Documentation Department of Trumpf GmbH+Co., 50p.
- TS 699, 1987, Doğal yapı taşları muayene ve deney yöntemleri, TSE yayınları, 82s.
- Ulusay, R., 1989, Pratik jeoteknik bilgiler, Teknomad yayınları, Ankara, 244s.
- Vasek, J., Martinec, P., Foldyna, J., and Hlaváč, L., 1993, Influence of properties of garnet on AWJ cutting process. In: Hashish M (ed) Proc. 7th Amer. Water Jet Conf. Vol.1, Water Jet Techn. Ass., St Louis, pp 365-387.
- Veenhuizen, S.D., Cheung, J.B. and Hill, J.R.M., 1978, Water jet drilling of small diameter holes, Proc. 4th Int. Symp. on Jet Cut. Tech., Canterbury, C3, pp12.
- Walters, C.L. and Saunders, D.H., 1991, Diajet cutting for nuclear decommissioning. In: Saunders D. (ed) Jet Cutting Technol. Elsevier Sci. Publ. Ltd., London, pp 427-440.
- Wang, J. and Guo, D.M., 2003, The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics, Journal of Material Processing Technology, Vol. 133, pp 371-377.
- Wellborn, W.W., 1996, Abrasive synthesis cut natural products down to size, Industrial Minerals, August, pp31-45.
- Wiederhorn, S.M. and Lawn, B.R., 1979, Strength degradation of glass impacted with sharp particles, J. Amer. Ceram. Soc., 62, 66-70.
- Wilson, J.W., Summers, D.A. and Gertsch, R.E., 1997, The developments of waterjets for rock excavation, 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation, Brisbane, Australia, pp A4-9 to A4-21.
- Xiaohong, L., Jiansheng, W., Yiyu, L., Lin, Y., Huiming, K. and Jiajun, S., 2000, Experimental investigation of hard rock cutting with collimated abrasive water jets, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 37, pp1143-1148.
- Yazıcı, S., 1989, Abrasive jet cutting and drilling of rock, PhD thesis, Univ. Of Missouri-Rolla, Rolla.
- Yie, G.G., 1984, Cutting hard materials with abrasive-entrained waterjet - a progress report. In: Walls I.A., Stanbury J. E. (eds), Proc. 7th Int. Symp. Jet Cutting Techn., BHRA Fluid Engng., Cranfield, pp 481-492.

KAYNAKLAR (Devam Ediyor)

Zeng, J., Heines, R. and Kim, T.J., 1991, Characterization of energy dissipation phenomena in abrasive water jet cutting, In: Labus T J (ed), Proc. 6th Amer. Water Jet Conf., Water Jet Techn. Ass., St. Louis, pp 163-177.

Zeng, J. and Kim, T.J., 1992, Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials, In: Lichtarowicz A. (ed) 1992 Jet Cutting Technol., Kluwer Acad. Press, Dordrecht, pp 483-501.

Zeng, J., Kim, T.J. and Wallace, R.J., 1992, Quantitative evaluation of machinability in abrasive waterjet machining, PED, 58, pp 169-179.

Zeng, J. and Kim, T.J. 1993, Parameter prediction and cost analysis in abrasive waterjet cutting operations. In: Hashish M (ed) Proc. 7th Amer. Water Jet Conf., Vol. 1, Water Jet Techn. Ass., St Louis, pp 175-189.

İnternet (www/ftp) kaynakları:

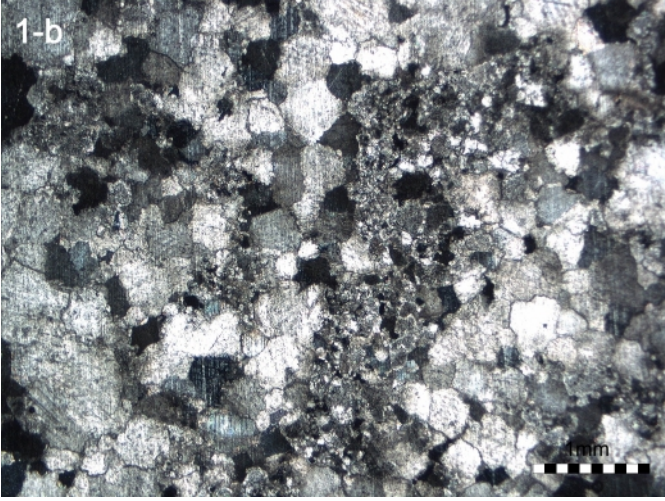
www.omax.com

www.berkeleychemical.com

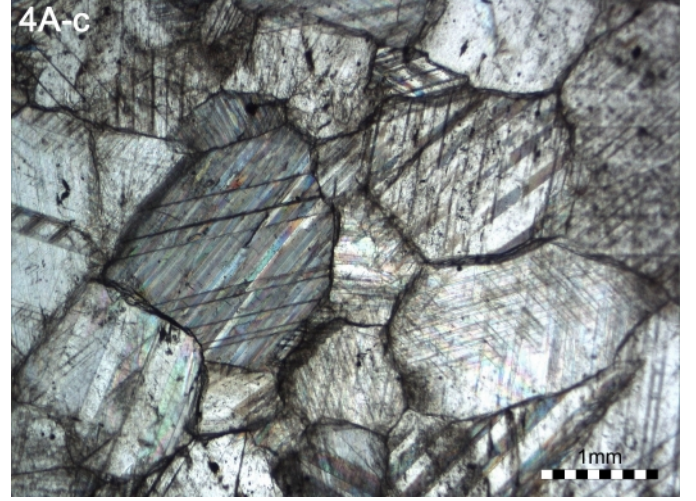
EKLER DİZİNİ

EK 1: Çalışmada Kullanılan Doğaltaşların İnce Kesit Fotoğrafları ve Tanımlamaları

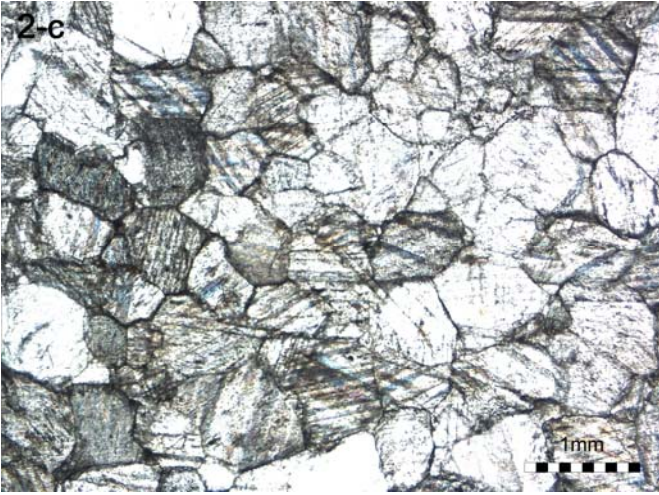
EK 1: Çalışmada Kullanılan Doğaltaşların İnce Kesit Fotoğrafları ve Tanımlamaları



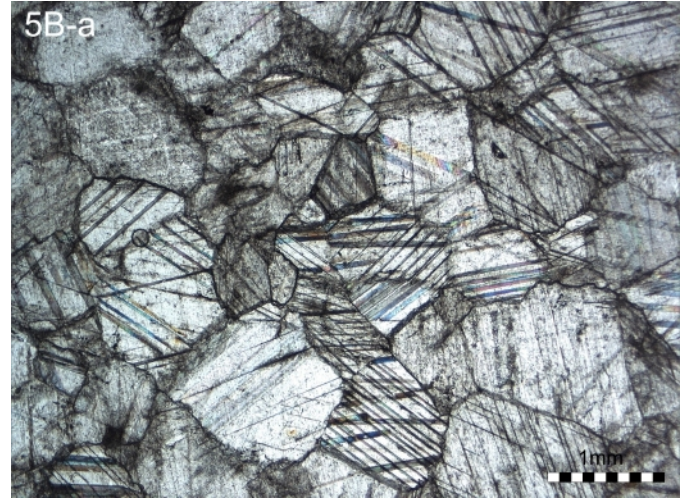
1 nolu örnek: Milas Sedef (Objektif: x 2,5)
Orta / ince taneli kristalin mermer



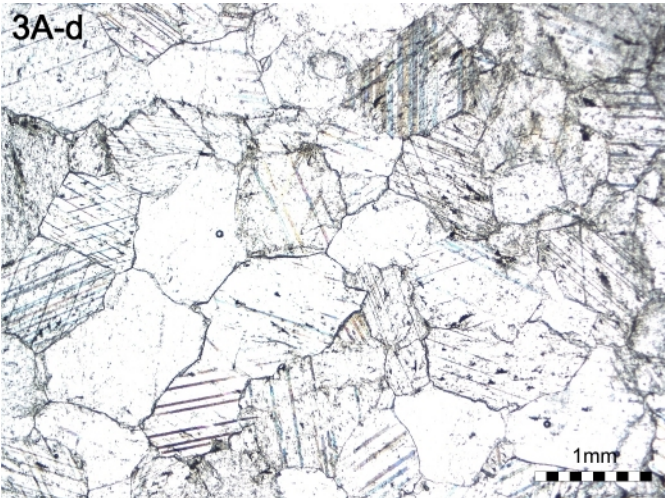
4 nolu örnek: Muğla Kristal Beyaz (Objektif: x 2,5)
İri taneli kristalin mermer



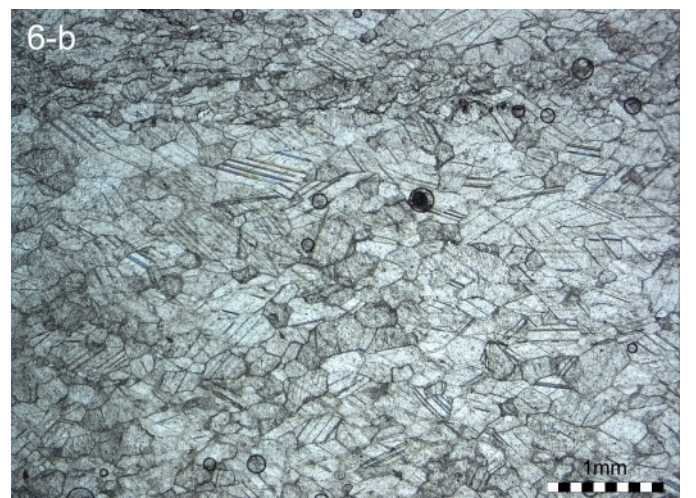
2 nolu örnek: Milas Limon (Objektif: x 2,5)
Orta taneli kristalin mermer



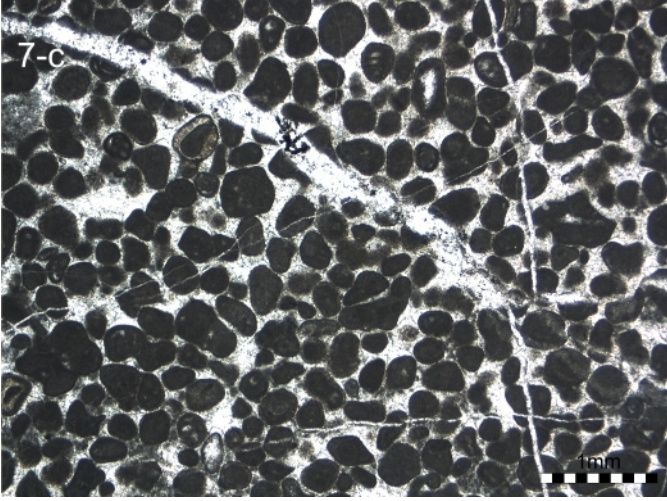
5 nolu örnek: Çobanlar Beyaz (Objektif: x 2,5)
Orta / iri taneli kristalin mermer



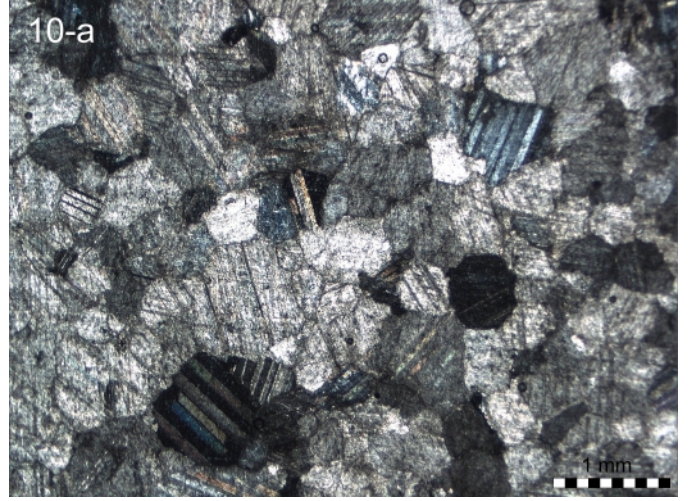
3 nolu örnek: Muğla Beyaz (Objektif: x 2,5)
İri taneli kristalin mermer



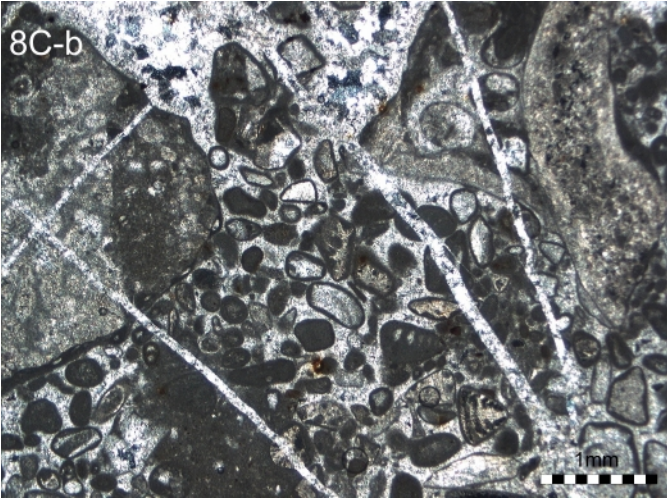
6 nolu örnek: Göktepe Siyah (Objektif: x 2,5)
İnce / orta taneli kristalin mermer



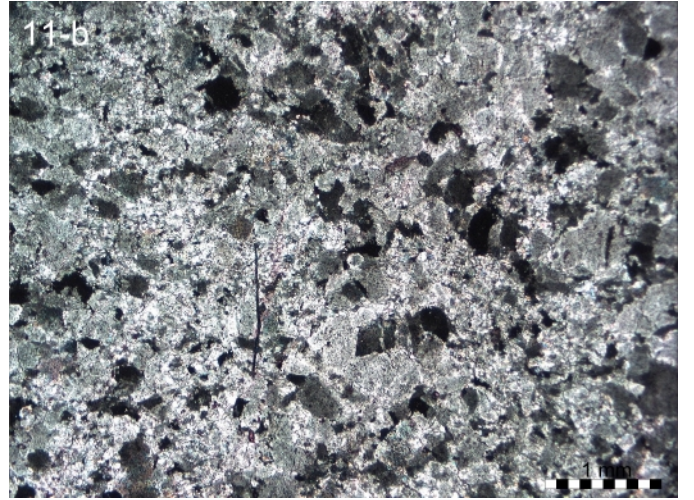
7 nolu örnek: Amasya Bej (Objektif: x 2,5)
Mikritik oolitik kireçtaşı



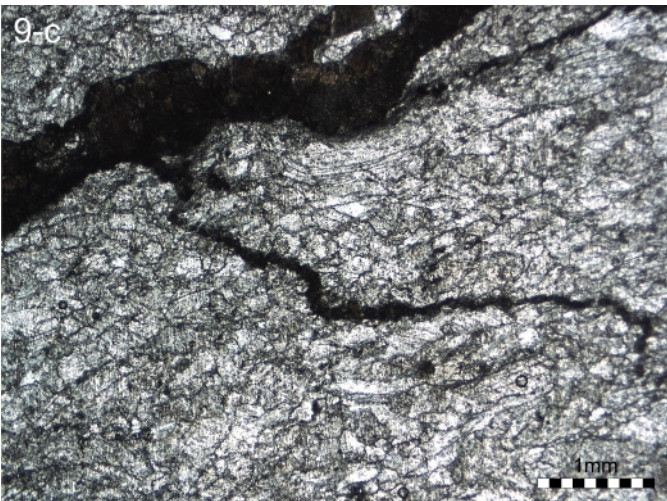
10 nolu örnek: Milas Leylak 1 (Objektif: x 2,5)
İnce / orta taneli kristalin mermer



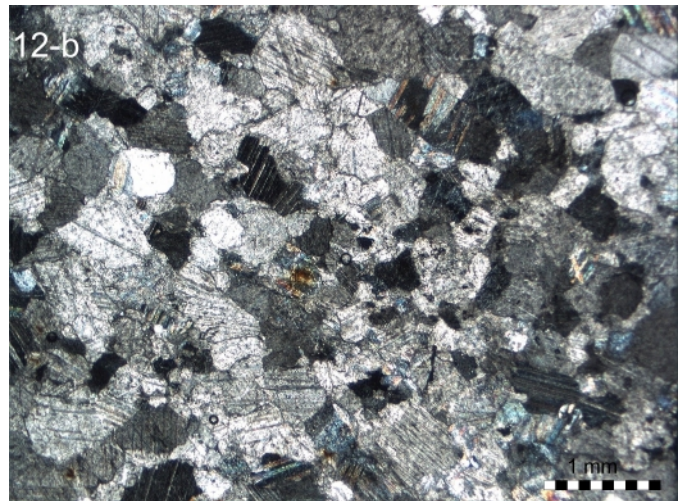
8 nolu örnek: Sivrihisar Bej (Objektif: x 2,5)
Mikritik sparitleşmiş kireçtaşı



11 nolu örnek: Milas Leylak 2 (Objektif: x 2,5)
İnce taneli kristalin mermer



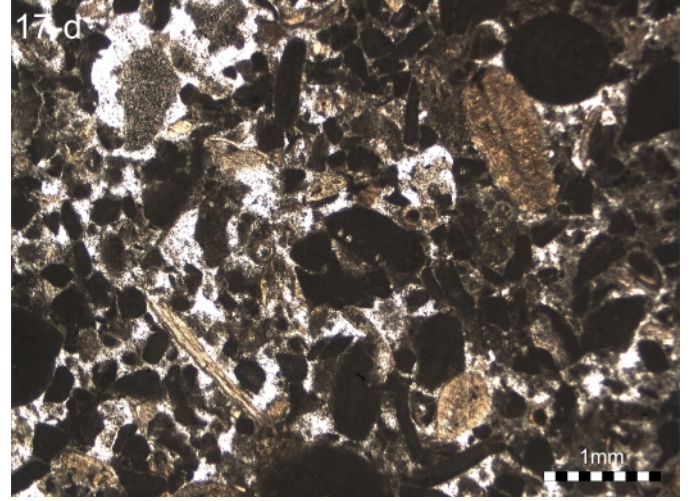
9 nolu örnek: Eskişehir Süpren (Objektif: x 2,5)
İnce / orta taneli kristalin mermer



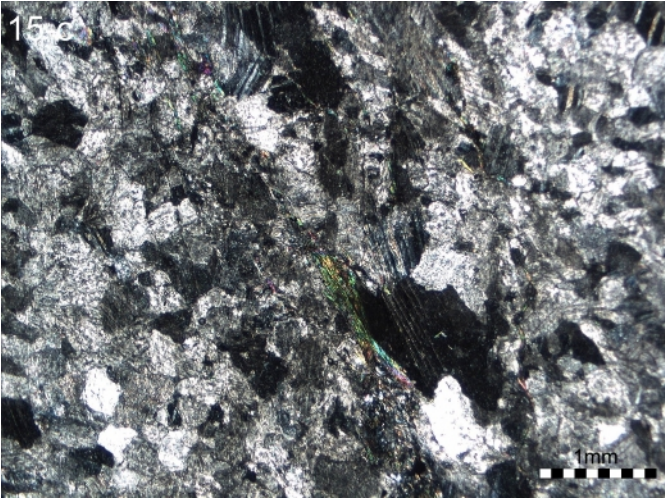
12 nolu örnek: Afyon Beyaz (Objektif: x 2,5)
Orta taneli kristalin mermer



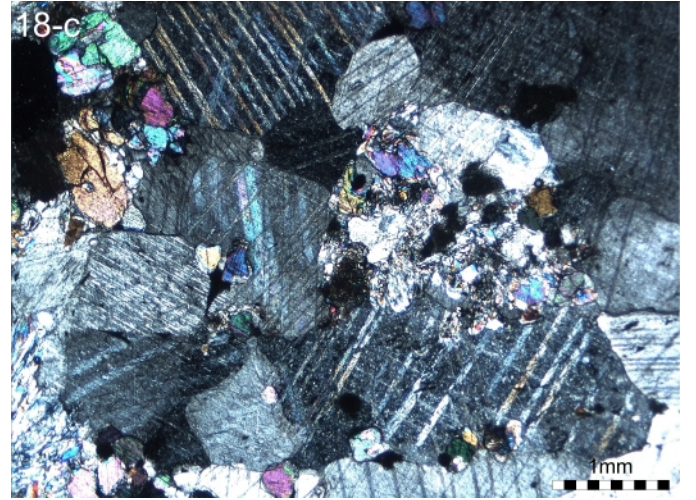
14 nolu örnek: Afyon Gri (Objektif: x 2,5)
İnce taneli kristalin mermer



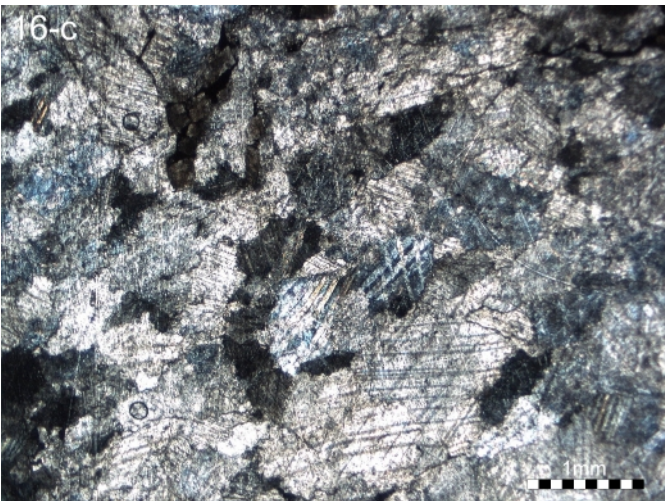
17 nolu örnek: Romance Bej (Objektif: x 2,5)
İnce taneli mikritik kireçtaşı



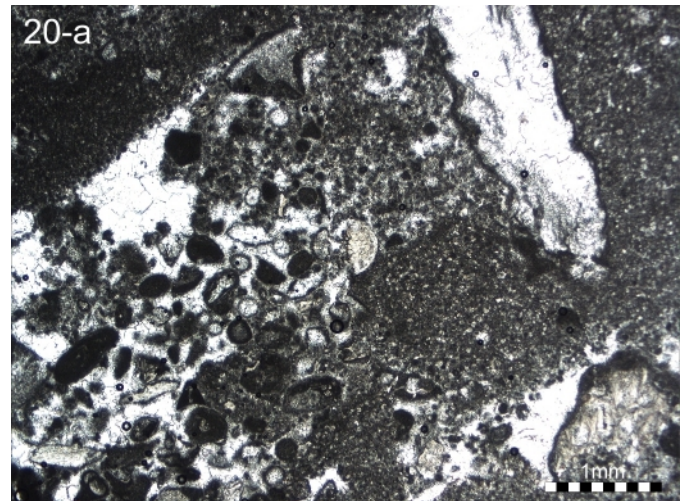
15 nolu örnek: Afyon Menekşe (Objektif: x 2,5)
İnce / orta taneli kristalin mermer



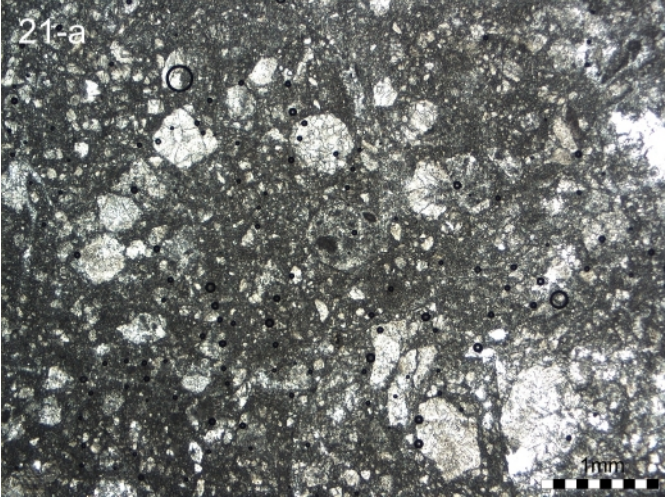
18 nolu örnek: Kaman İncisi (Objektif: x 2,5)
İri taneli kalsilikatik mermer



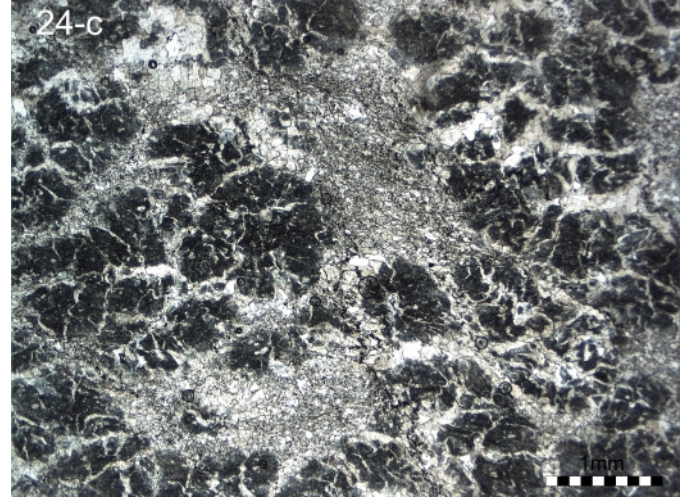
16 nolu örnek: Akşehir Siyah (Objektif: x 2,5)
Orta / ince taneli kristalin mermer



20 nolu örnek: Bilecik Bej (Objektif: x 2,5)
İnce /orta taneli sparitleşmiş mikritik kireçtaşı



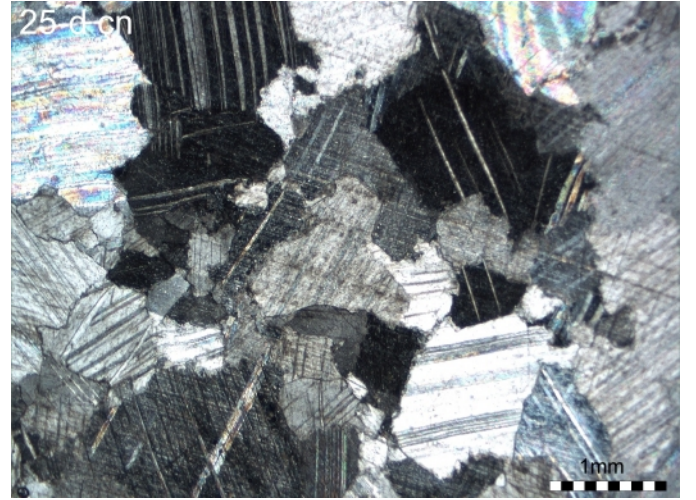
21 nolu örnek: Crema Tem (Objektif: x 2,5)
İnce taneli mikritik kireçtaşı



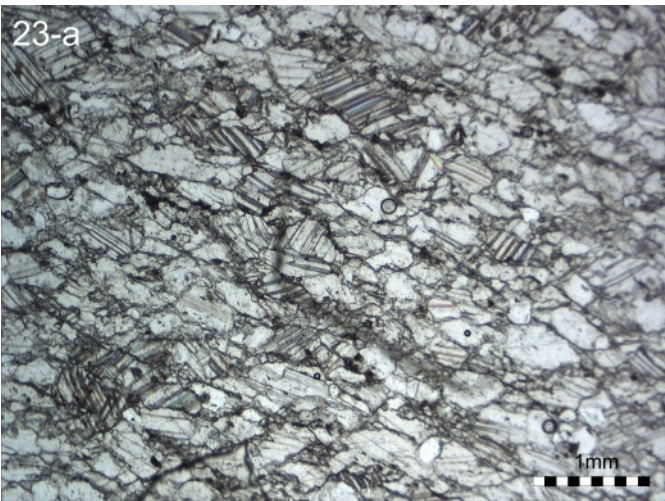
24 nolu örnek: Ege Bordo (Objektif: x 2,5)
Orta ince taneli spariteşmiş kalsit



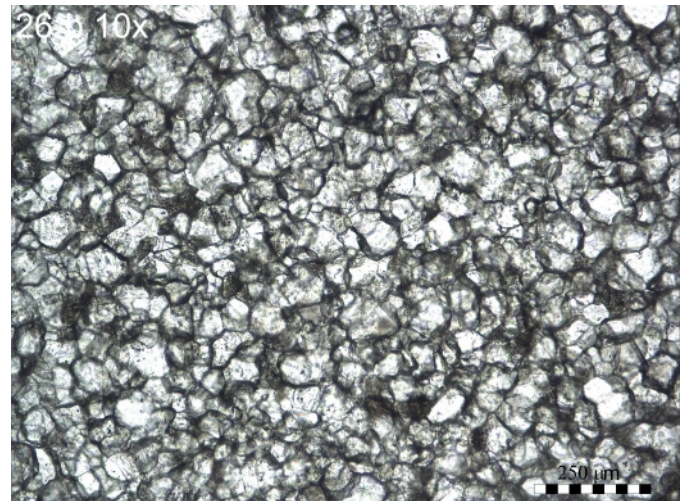
22 nolu örnek: Fosilli Bej (Objektif: x 2,5)
İri taneli fosilli kireçtaşı



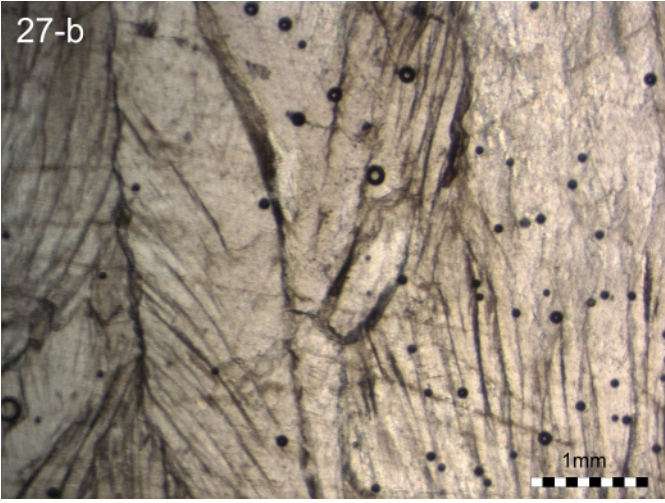
25 nolu örnek: Uşak Beyazı (Objektif: x 2,5)
İri taneli kristalin mermer



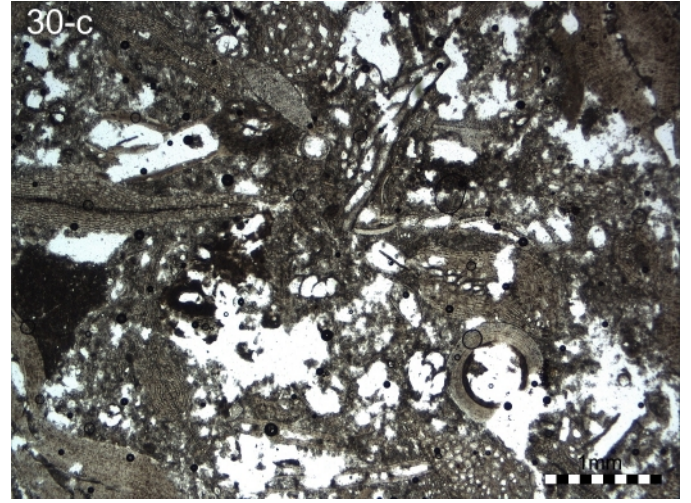
23 nolu örnek: Uşak Yeşili (Objektif: x 2,5)
İnce / orta taneli kristalin mermer



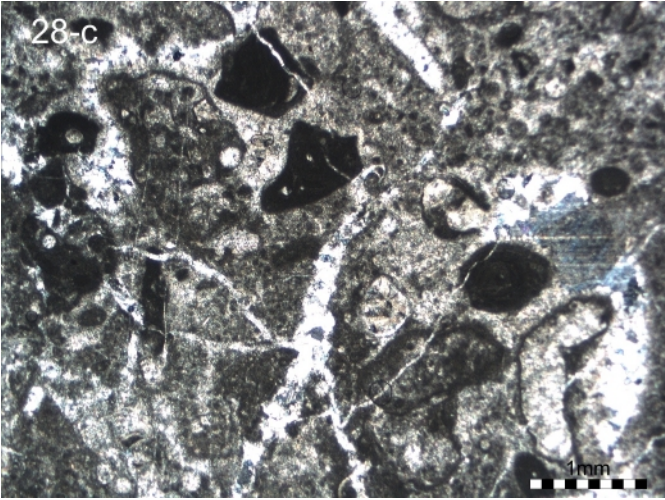
26 nolu örnek: Marmara Dolomit (Objektif: x 10)
İnce taneli kristalin dolomitik mermer



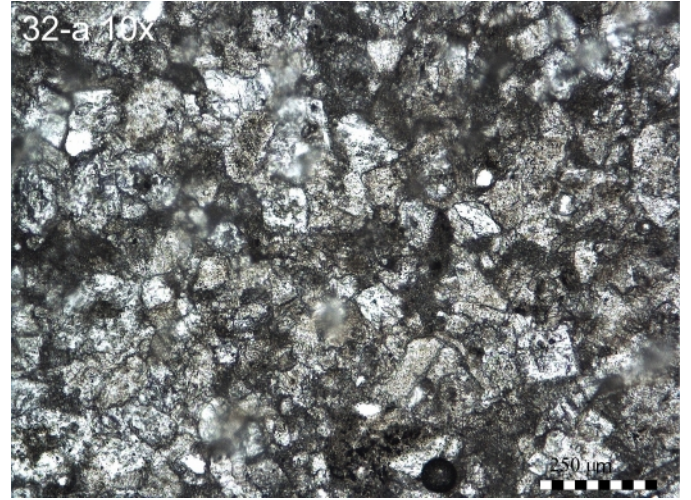
27 Akhisar Oniks (Objektif: x 2,5)
İri taneli kristalin oniks



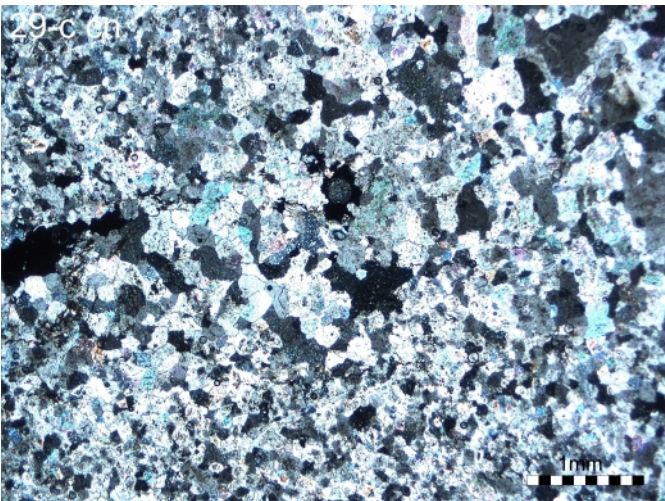
30 nolu örnek: Kufeki Taşı (Objektif: x 2,5)
Orta / iri taneli fosilli kireçtaşı



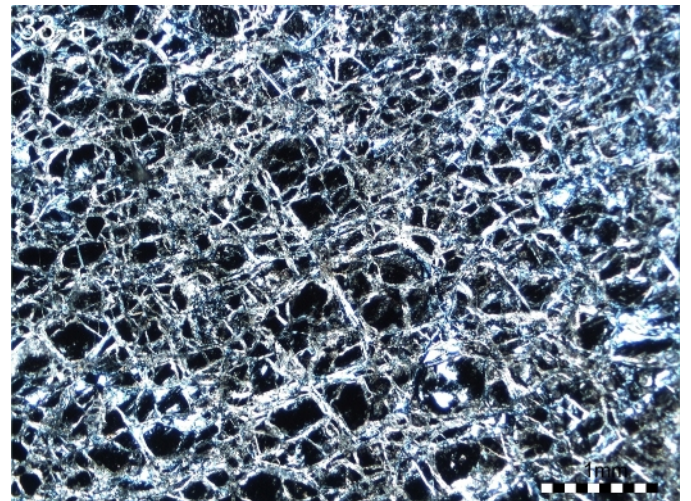
28 nolu örnek: Denizli Traverten (Objektif: x 2,5)
İnce taneli traverten



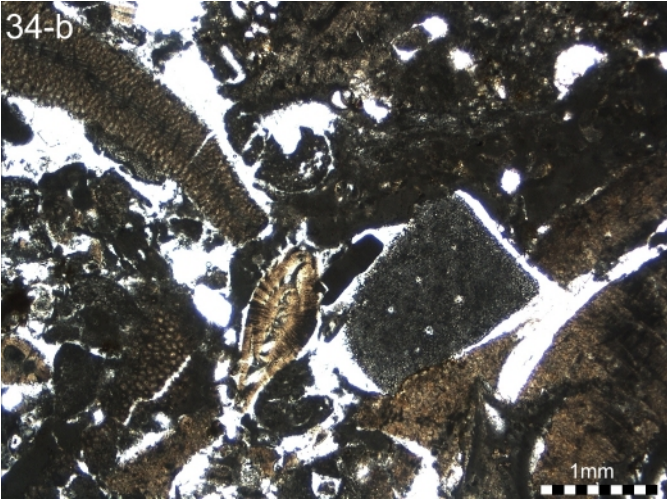
32 nolu örnek: Antalya Limra (Objektif: x 10)
İnce taneli mikritik kireçtaşı



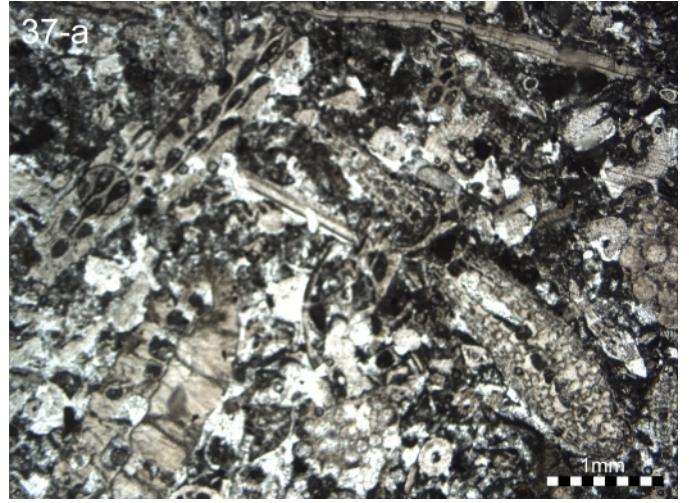
29 nolu örnek: Sarı Traverten (Objektif: x 2,5)
İnce taneli traverten



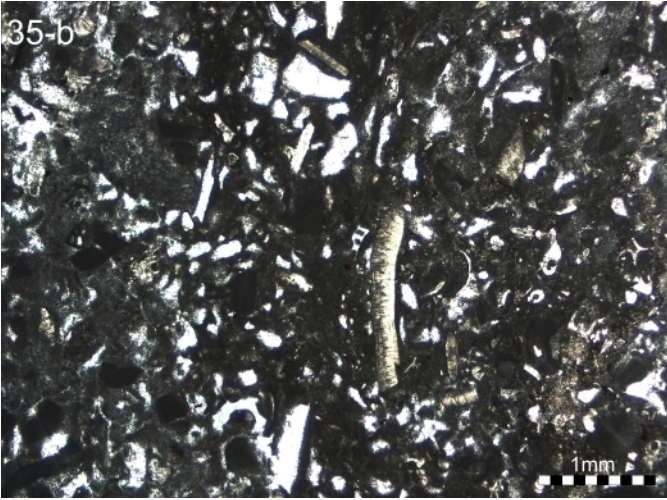
33 nolu örnek: Elazığ Vişne (Objektif: x 2,5)
Breşik yapılı mermer



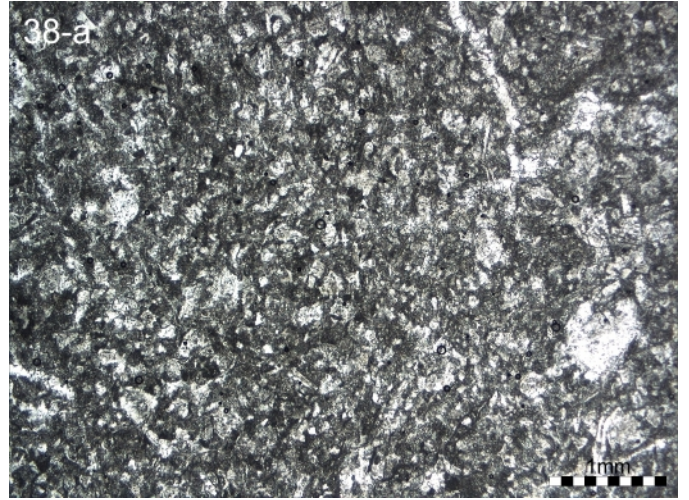
34 nolu örnek: Elazığ Sunta (Objektif: x 2,5)
Orta / iri taneli fosilli kireçtaşı



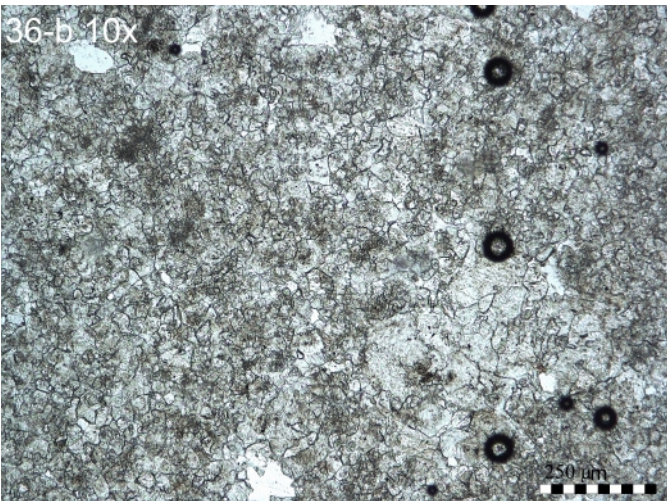
37 nolu örnek: Papatya Bej (Objektif: x 2,5)
Sparitleşmiş mikritik kireçtaşı



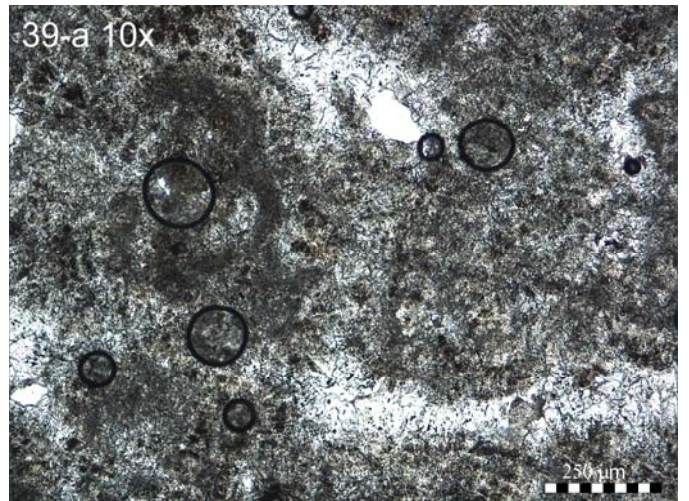
35 nolu örnek: Hazar Pembe (Objektif: x 2,5)
Fosilli mikritik kireçtaşı



38 nolu örnek: Hazar Koyu Bej (Objektif: x 2,5)
İnce taneli mikritik kireçtaşı



36 nolu örnek: Hazar Traverten (Objektif: x 10)
İnce taneli traverten



39 nolu örnek: Hazar Traverten (Objektif: x 10)
İnce taneli traverten

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İrfan Celal ENGİN

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1976

Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1989-1992 Ankara Cumhuriyet Lisesi

Lisans 1992-1997 H. Ü. Müh. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1997-2000 H. Ü. Fen Bil. Ens. Maden Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

1997-2004 Araştırma Görevlisi, H. Ü. Müh. Fak. Maden Mühendisliği Bölümü

2004-..... Öğretim Görevlisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi İncehisar MYO