

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SU JETİYLE KAYAÇ KESMEDE ÇEŞİTLİ AŞINDIRICILARIN KULLANIMI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mad. Müh. Serkan KAYA**

**ARALIK 2016**

**TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Maden Mühendisliği Anabilim Dalında  
Serkan KAYA Tarafından Hazırlanan

SU JETİYLE KAYAÇ KESMEDE ÇEŞİTLİ AŞINDIRICILARIN KULLANIMI

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 06 / 12 / 2016 gün ve 1679 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. İzzet KARAKURT

Üye : Doç. Dr. Gökhan AYDIN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Emre AYDINÇAKIR

İzzet K.

Gökhan Aydın

Emre Aydınçakır

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ  
Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Bu tez, K.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Tez danışmanlığımı üstlenerek, gerek konu seçimimde ve çalışmalarımda gerekse eğitim hayatım dışındaki problemlerimde bilgi ve tecrübesiyle her an desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Gökhan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım boyunca yaptığım işlemlerde referans ve yardımcı olan, sık sık bilgi ve desteğine başvurduğum değerli hocam Doç. Dr. İzzet KARAKURT'a minnetlerimi sunarım. Davetimizi kırmayarak çalışmalarımın değerlendirilmesinde değerli emeklerini esirgemeyen tez jüri üyesi Sayın Yrd. Doç. Dr. Emre AYDINÇAKIR'a ayrıca teşekkür ederim. Bölüm laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü Başkanı Sayın Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ'a; mikroskop görüntüleri için K.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümünden Sayın Prof. Dr. İbrahim UYSAL ve Arş. Gör. Samet SAKA'ya; çalışmalarım süresince yardım ve bilgilerini benden esirgemeyen sayın bölüm hocalarım Prof. Dr. Hacı DEVECİ, Prof. Dr. İbrahim ALP, Yrd. Doç. Dr. Oktay CELEP, Yrd. Doç. Dr. Ersin Yener YAZICI, Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇAPİK, Yrd. Doç. Dr. Kadir KARAMAN, Arş. Gör. Serkan İNAL, Arş. Gör. Serdar YAŞAR, Arş. Gör. Özüm YAŞAR, Arş. Gör. Tekin YILMAZ, Arş. Gör. Fırat AHLATCI, Arş. Gör. Şener ALİYAZICIOĞLU ve tüm bölüm personeline ve de Maden Yüksek Mühendisi Pelin ALTINKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Aşındırıcı Su Jeti'ni kullanarak çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Asser Ltd. Şti. Rescoo Glass Mosaic ve Emre AKAN'a; kesim yaptığım mermerleri temin ettiğim Turan Bekişoğlu Mermer San. ve Tic. A.Ş. ve değerli dostum Endüstri Mühendisi Onur AKALIN'a; Kuhmichel Abrasiv ve Habib AYKOL'a, Zımaş Zımpara ve Değirmen Taşı Sanayii A.Ş., ŞE-TAT Madencilik, ARGETEST ve kayaç kesmeyle ilgili ihtiyaç olduğunda yardımlarını esirgemeyen Güvencem Mermer'e teşekkür ederim.

Hayatım boyu maddi ve manevi anlamda her zaman yanımda olan aileme ve değerli dostlarıma en derin şükranlarımı sunarım.

Serkan KAYA

Trabzon 2016

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “SU JETİYLE KAYAÇ KESMEDE ÇEŞİTLİ AŞINDIRICILARIN KULLANIMI” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Gökhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

22/12/2016

Serkan KAYA

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Türkiye ve Dünya Doğal Taş Potansiyeli.....	2
1.3. Doğal Taş Kesme ve İşleme Teknolojileri.....	2
1.3.1. Doğal Taş Ocaklarında ve Fabrikalarında Kullanılan Makineler.....	3
1.4. Su Jeti ile Kesme.....	6
1.4.1. Su Jeti'nin Tarihçesi.....	7
1.4.2. Su Jeti Kesme Makinesi ve Bileşenleri.....	7
1.4.3. Su Jeti ile Kesmenin Temel Esasları.....	11
1.4.4. Su Jeti Kesme Parametreleri.....	12
1.4.5. Su Jeti ile Kesmede Kerf ve Yüzey Karakteristikleri.....	14
1.4.6. Su Jeti ile Kesmenin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması.....	17
1.4.7. Su Jeti'nin Kullanım Alanları.....	18
1.5. Aşındırıcılar.....	20
1.6. Literatür Özeti.....	22
1.7. Çalışmanın Amacı.....	23
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Materyaller.....	24
2.2. Deney Düzenegi ve Kesim Çalışmaları.....	29
2.3. Kesme Sonrası Kesme Geometrilerinin Analizi.....	33
3. BULGULAR.....	37

3.1.	Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kesme Genişliğinin Değişimi .....	37
3.2.	Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kerf Açılarının Değişimi .....	38
3.3.	Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kesme Derinliklerinin Değişimi .....	40
3.4.	Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi .....	42
3.5.	İrdeleme .....	44
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	48
5.	KAYNAKLAR.....	50

ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

SU JETİYLE KAYAÇ KESMEDE ÇEŞİTLİ AŞINDIRICILARIN KULLANIMI

Serkan KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Gökhan AYDIN  
2016, 53 Sayfa

Bu çalışmada, çeşitli aşındırıcıların su jeti ile kayaç (mermer) kesmedeki performansları araştırılmaktadır. Su jeti ile kesme uygulamalarında kullanılma potansiyeli bulunan farklı aşındırıcı türleri (garnet, alüminyum oksit beyaz, alüminyum oksit kahverengi, silisyum karbür, cam küre, zımpara tozu, granit, olivin ve bakır fırın cürufu) çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Kesme işlemi süresince çalışma parametreleri sabit tutulmuştur. Aşındırıcıların kesme performansları, bazı göstergeler (kesme genişliği, kesme derinliği, kesme-aşınma bölgesi derinliği, kerf açıları ve yüzey pürüzlülüğü) temelinde değerlendirilmiştir. Çalışma neticesinde, alüminyum oksit kahverenginin kesme derinliği ve giriş kerf açısı temelinde en iyi performansı sunduğu görülmüştür. Ayrıca, alüminyum oksit beyaz ve zımpara tozunun, sırasıyla çıkış kerf açısı ve kesme genişliği temelinde iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ek olarak, camın yüzey pürüzlülüğü temelinde iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, olivin ve fırın cürufunun nozülde tıkanmalara yol açtığı görülmüştür. Sonuç olarak, olivin ve fırın cürufu dışındaki aşındırıcıların su jeti ile kayaç kesmede ihtiyaç duyulan standartlar temelinde etkin bir şekilde kullanılabileceği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşındırıcılı Su Jeti, Aşındırıcılar, Mermer, Kayaç Kesme, Kesme Performansı



Master Thesis

SUMMARY

USE OF VARIOUS ABRASIVES IN ROCK CUTTING BY WATERJET

Serkan KAYA

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan AYDIN  
2016, 53 Pages

In this study, performances of various abrasives in rock (marble) cutting by waterjet (WJ) are investigated. Different types of abrasives (garnet, white fused alumina, brown fused alumina, silicon carbide, glass beads, emery powder, granite, olivine and copper furnace slag) being usable as an abrasive in waterjet cutting applications are considered. The cutting parameters are kept constant during the cutting operations. Cutting performances of the abrasives are evaluated based on some indicators (cutting width, cutting depth, cutting-wear zone depth, kerf angle and surface roughness). As a result of the study, it is seen that brown fused alumina presents the best performances in terms of the cut depth and the kerf angle access. Moreover, it is determined that white fused alumina and emery powder present better performances based on the kerf angle exit and cutting width, respectively. Additionally, it is observed that glass bead presents good results with regard to the surface roughness. On the other hand; it is seen that olivine and furnace slag exhibit poor cutting performances due to the blockages occurred in the nozzle. Consequently, the study revealed that the abrasives apart from the olivine and furnace slag can be used effectively in rock cutting applications by waterjet depending on the required standards.

**Key Words:** Abrasive Waterjet, Abrasives, Marble, Rock Cutting, Cutting Performance

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Plaka ve fayans hattı akım şeması (Göktaş ve Güneş, 2006) .....	4
Şekil 1.2. Aşındırıcılı su jeti sisteminin şematik görünümü (Kartal, 2015) .....	8
Şekil 1.3. ASJ makinesi ve bileşenleri (URL-3, 2016) .....	8
Şekil 1.4. ASJ’de kullanılan tipik bir nozül (Pi, 2008) .....	10
Şekil 1.5. ASJ ile kesmede kesme ve deformasyon aşınma bölgeleri (Coşansu, 2010).....	11
Şekil 1.6. Su jeti ile kesmede kerf profili şematik gösterimi (Liu, 2004) .....	15
Şekil 1.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm parametreleri (URL-4, 2016).....	17
Şekil 1.8. Su jeti ile kesilerek hazırlanmış çeşitli ürünler (URL- 5, 2016) .....	19
Şekil 2.1. Sivrihisar Bej (Crema Eda) mermer yüzey detayı ve plakalar .....	24
Şekil 2.2. Aşındırıcı hazırlama boyut küçültme işlemleri .....	27
Şekil 2.3. Aşındırıcıların mikroskop altında görünümü .....	28
Şekil 2.4. ASJ makinesi ve deney düzeneği .....	29
Şekil 2.5. Bilgisayarda kesim planının programlanması .....	30
Şekil 2.6. ASJ ile mermer kesim işlemi .....	31
Şekil 2.7. ASJ’nin aşındırıcı haznesi ve aşındırıcının hazneye beslenmesi .....	32
Şekil 2.8. ASJ kontrol paneli .....	32
Şekil 2.9. Kesilen bir mermer plakanın yüzey görünümü .....	33
Şekil 2.10. Kesme genişliğinin ölçümü .....	33
Şekil 2.11. Kerf açısı hesaplamak için kullanılacak parametrelerin ölçümü.....	34
Şekil 2.12. Mermer plakaların dairesel testere ile kesimi.....	35
Şekil 2.13. Kesim hattı boyunca dilimlere ayrılmış mermer plaka .....	35
Şekil 2.14. Kesme derinliğinin ölçümü .....	35
Şekil 2.15. Pürüzlülük ölçüm cihazı ve kesim yüzeylerinde pürüzlülük değerlerinin ölçümü .....	36
Şekil 3.1. Kesme genişliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi .....	37
Şekil 3.2. Giriş kerf açısının aşındırıcılara bağlı değişimi .....	38
Şekil 3.3. Çıkış kerf açısının aşındırıcılara bağlı değişimi .....	39
Şekil 3.4. Kesme derinliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi.....	40
Şekil 3.5. Kesme-aşınma derinliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi .....	41
Şekil 3.6. Aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi.....	43

Şekil 3.7. Kuadratik ortalama pürüzlülük ( $R_q$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi ..... 43

Şekil 3.8. Maksimum pürüzlülük derinliği ( $R_z$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi..... 44



## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. ASJ ile kesmede kullanılacak su için önerilen kalite değerleri (Tikhomirov vd., 1992; Ergür, 2007).....	9
Tablo 2.1. Sivrihisar Bej mermerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	24
Tablo 2.2. DeneYlerde kullanılan aşındırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri .....	25
Tablo 2.3. Baltic brown granitinin mineralojik analizi (Karakurt, 2011).....	26
Tablo 2.4. Kullanılan aşındırıcıların kimyasal analizleri .....	28
Tablo 2.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılı su jeti makinesine ait özellikler..	29
Tablo 2.6. Kesme parametreleri ve değerleri .....	30
Tablo 3.1. Kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği ( $h_a/h_t$ ) oranının aşındırıcılara bağlı değişimi .....	42
Tablo 3.2. Aşındırıcıların kesme performans sıralaması.....	45
Tablo 3.3. Aşındırıcıların garnete göre performansları .....	46
Tablo 3.4. Kullanılan aşındırıcıların birim fiyatları (2016).....	47

## SEMBOLLER DİZİNİ

ASJ	Aşındırıcı Su Jeti
$h_a$	Kesme-aşınma Bölgesi Derinliği (mm)
$h_k$	Kerf Derinliği (mm)
$h_t$	Toplam Kesme Derinliği (mm)
$R_a$	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük ( $\mu\text{m}$ )
$R_q$	Kuadratik Ortalama Pürüzlülük ( $\mu\text{m}$ )
$R_z$	Maksimum Pürüzlülük Derinliği ( $\mu\text{m}$ )
W	Kesme Genişliği (mm)
$W_{alt}$	Alt Yarık Genişliği (mm)
$W_{üst}$	Üst Yarık Genişliği (mm)
$\Theta$	Kerf Açısı (derece)

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Doğal taş kullanımının insanlık tarihi kadar eski olduğu bilinmektedir. İlk dönemlerde doğal taşlar avlanma amacıyla çeşitli silahların yapımında kullanılmıştır. Ayrıca, eski dönemlerde barınma ve korunma amaçlı olarak doğal taşların yaygın bir şekilde kullanıldığı da bilinmektedir. Günümüzde doğal taşlar başlıca; inşaat sektöründe, çeşitli mekanların (iç-dış) kaplanmasında ve döşeme malzemesi olarak; anıt, heykel, süs eşyası ve mezar taşı yapımlarında olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yaygın kullanım alanlarının bir sonucu olarak doğal taş sektörü dünyada ve ülkemizde hızla gelişim göstermektedir. Sektör, özellikle son yıllarda madencilik faaliyetlerinin en önemli alt kollarında birisi haline gelmiştir.

Jeolojik tanımıyla “Mermer”; kireçtaşı, dolomit gibi kayaçların belirli sıcaklık ve basınç altında başkalaşıma uğrayarak, tekrar kristalleşip, yeni bir yapı kazanmaları sonucu oluşan kayaçlardır. Bunlar “Gerçek Mermer” olarak adlandırılırlar. Endüstriyel anlamda ise kesilip parlatılabilen her türlü kaya mermer olarak isimlendirilir. Dolayısıyla jeolojik olarak mermer gibi metamorfik kayaç olmamasına rağmen, granit ve siyenit gibi magmatik kayaçlar ile kireçtaşı ve traverten gibi sedimanter kayaçlar da blok halinde çıkarılabildiği ve kesilip-parlatılabildiği için ticari olarak mermer sınıfına girmektedir. “Doğal Taş” tanımıyla, söz konusu bu kayaçların hepsi kastedilmektedir. 3213 Sayılı Maden Kanunu’nda mermer, “Madenler” başlığı altında 2. maddede “II. Grup Madenler” sınıfında “Mermer, Dekoratif Taşlar, Traverten, Kalker, Dolomit, Kalsit, Granit, Siyenit, Andezit, Bazalt ve benzeri taşlar” tanımlaması ile verilmektedir (T.C. Resmi Gazete, 1985).

Doğal taş üretimi ve işlemindeki yöntemler, artan talep ve üretime paralel olarak zaman içerisinde biçim değişimine uğramış, çeşitlenmiş ve teknolojik gelişmelerden faydalanmıştır. Üretim verimliliğini ve hızını artırma amacıyla ortaya çıkan birçok yöntem doğal taş sektöründe uygulama alanı bulmuş ve yıllardan beri kullanıla gelmiştir. Aşındırıcılı Su Jeti (ASJ) de bu alanda kullanılan alternatif teknolojilerden bir tanesidir. Yöntem, sahip olduğu çeşitli özellikler ile ön plana çıkmakta ve diğer geleneksel sistemlere nazaran çeşitli avantajlar sunmaktadır.

## 1.2. Türkiye ve Dünya Doğal Taş Potansiyeli

Geçmişten günümüze Türkiye'deki doğal taş üretim trendi incelendiğinde eğilimin pozitif yönde olduğu ve artışın özellikle son dönemlerde kayda değer bir hal aldığı gözlenmektedir. Türkiye'de 1968 yılında üretilen toplam doğal taş miktarı yıllık yaklaşık 70000 ton iken bu rakam 2001'de 2,5 milyon tona ve 2016'da 11,5 milyon tona ulaşmıştır (Arıkan,1968; Onargan vd., 2006). Yaklaşık 13,9 milyar ton (5,1 milyar m<sup>3</sup>) görünür rezervle dünya toplam doğal taş rezervinin yaklaşık %33'ünün ülkemizde bulunduğu tahmin edilmektedir (T.C. Ekonomi Bakanlığı, 2016). Türkiye'de 80'nin üzerinde değişik yapıda, 120'nin üzerinde değişik renk ve desende doğal taş rezervi belirlenmiştir. Süpren, Elazığ Vişne, Akşehir Siyah, Manyas Beyaz, Bilecik Bej, Kaplan Postu, Denizli Traverten, Ege Bordo, Milas Leylak, Gemlik Diyabaz ve Afyon Şekeri uluslararası piyasada rağbet gören en tanınmış doğal taş çeşitleridir (Aydın, 2012).

Birçok farklı ülkeye ihracat yapılan doğal taş ticaretinde Çin, ABD., Irak, Suudi Arabistan ve İngiltere, ihracatımızda ilk sırada yer alan ülkeler arasındadır. Doğal taş ithalatı yapılan en önemli ülkeler ise Çin, Hindistan, İspanya ve İtalya'dır (URL-1, 2016). Türkiye, dünya doğal taş sektöründe üretimde %3,1'lik bir payla dokuzuncu, ihracatta ise %2,3'lük bir payla sekizinci sırada yer almaktadır (URL-2, 2016). Çin ve İtalya ilk iki sıradaki ülkeler olarak dikkat çekmektedir.

Zengin doğal kaynaklarının miktar ve çeşitliliğinden dolayı Türkiye doğal taş endüstrisi, gerek yerli gerekse yabancı yatırımlar açısından karlı ve verimli bir gelecek sunmaktadır.

## 1.3. Doğal Taş Kesme ve İşleme Teknolojileri

Doğal taşlar, kullanım amacına bağlı olarak genellikle düzgün ve çatlaksız bloklar ve plakalar halinde üretilmektedirler. Bu amaçla, ocaklardan son ürün haline gelinceye kadar sürekli bir kesme işlemi uygulanmasına ihtiyaç duyarlar. Bu işlem için uygulama gereksinimlerine uygun bir şekilde geliştirilmiş farklı makine ve ekipmanlar kullanılmaktadır.

### 1.3.1. Doğal Taş Ocaklarında ve Fabrikalarında Kullanılan Makineler

Doğal taşlar genellikle açık işletme yöntemiyle üretilmektedir. Ancak, açık işletme uygulamasının çeşitli gerekçelerden ötürü uygulanabilir olmadığı (çok derin yataklar, çevresel kaygılar vs.) durumlarda yeraltı işletmeciliği de doğal taş üretiminde uygulanabilmektedir. Yeraltı maden işletme metodlarından oda-topuk yöntemi genellikle bu amaçla kullanılmaktadır (Kulaksız, 2012).

Genel olarak altyapısı tamamlanmış ve örtü tabakası temizlenmiş açık ocak doğal taş işletmeciliğinde ana kütleden blok kesimi için aşağıdaki evreler takip edilir:

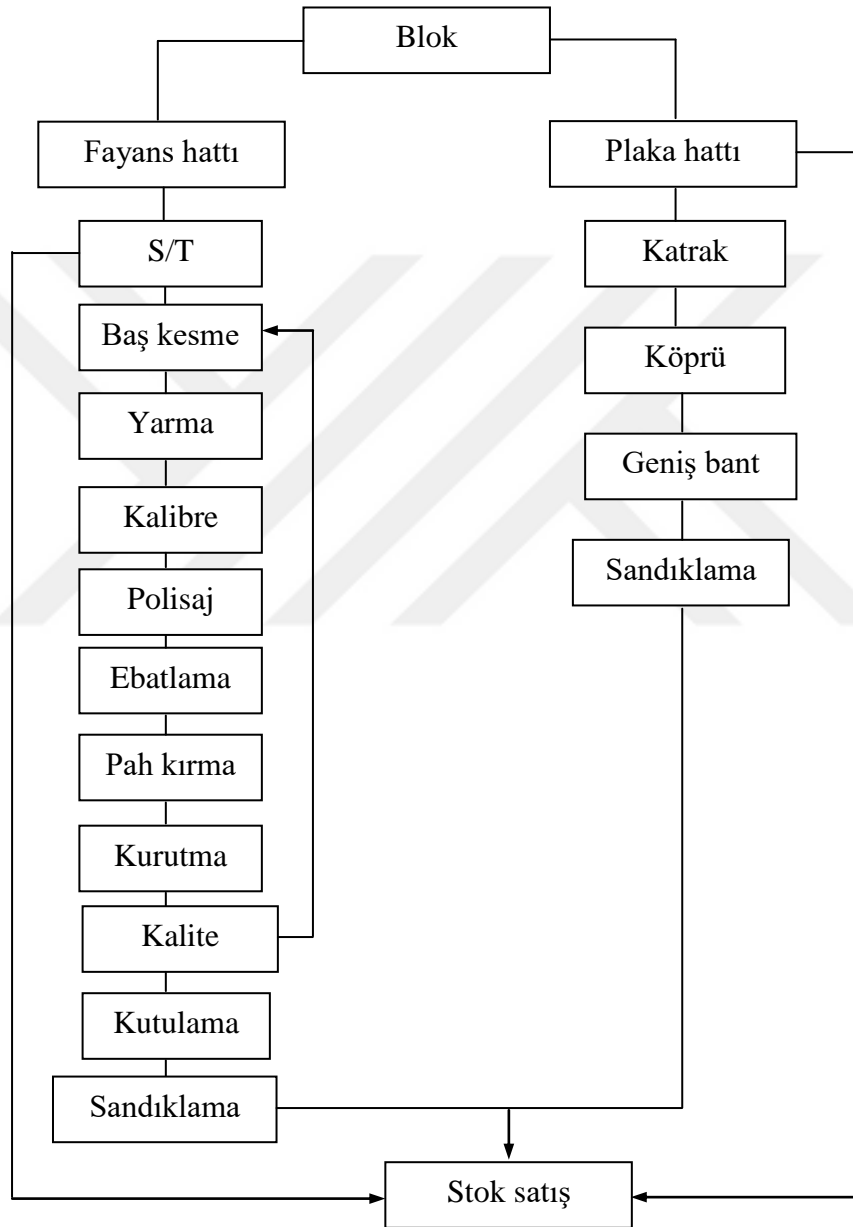
- i. Üretim öncesi hazırlık-kanal açma (yarma-oluk)
- ii. Doğal taş bloğun ana kütleden ayrılması (delme-kesme)
- iii. Doğal taş blokların ötelenmesi ve devrilmesi
- iv. Gerekli ise devrilen blokların daha küçük bloklara kesilmesi (sayalama)
- v. Kesilmiş blokların kaldırılması, yüklenmesi ve nakliyesi.

Kanal açma, kesme, sayalama işlemleri ve bu işlemlerde doğal taşların kesilmesi için kullanılan yöntem ve makineler, doğal taş ocak işletmeciliğinin temelini oluşturmaktadır. Ocaklardan üretilen doğal taşların genellikle düzgün prizmalar halinde kesilmesi arzulanır. Teknolojik gelişmelerin yeterli olmadığı dönemlerde, doğal taş üretimi için daha basit yöntemler kullanılmıştır. İnsan gücüne dayalı bu yöntemler; kama/manivela, keski/çekici, kuvars kumu/ağaç tapan ve ateş/su yöntemleri olarak isimlendirilmektedirler. Günümüzde, insan gücüne dayalı kesme yöntemlerinin yerini mekanizasyona dayalı çeşitli yöntemler almıştır. Açık ocak doğal taş madenciliğinde yaygın olarak uygulanan yöntemleri mekanik-özel ve karma yöntemler olarak sınıflamak mümkündür. Mekanik yöntemler; helezon tel kesme, elmas tel ile kesme, elmas kayış kollu kesici, zincirli kesicilerle kesme, yakarak kesme (termal şok) ve hidrolik kesme (su jeti) yöntemlerini içermektedir. Elmas tel ile kesme yöntemi doğal taş ocaklarında en çok tercih edilen mekanik yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Doğal taş sahalarında sistematik ve bilimsel olarak en az kayıpla mermer üretiminin gerçekleştirilebilmesi için bazen yukarıdaki yöntemler birlikte kullanılabilir. Genelde kollu kesiciler ve elmas tel yöntemi kombine olarak sıklıkla kullanılmaktadır (Onargan vd., 2006).

Doğal taş ocaklarında üretilen bloklar, kullanım amaçları doğrultusunda son ürün haline getirilmek için doğal taş işleme tesislerinde (mermer fabrikaları) yine belli bir plan ve düzen doğrultusunda sistematik kesme ve düzeltme işlemlerinden geçirilirler. Doğal taş



işleme tesislerinde, genellikle levha ve plaka hattı olmak üzere iki ayrı kesim organizasyonu mevcuttur. Mutfak tezgahı gibi geniş boyutlu doğal taşlar plaka hatlarında, duvar döşemelerinde kullanılan fayans gibi genişliği az doğal taşlar ise fayans hatlarında üretilirler. Bu hatlarda yapılan işlem basamaklarını ve kullanılan makineleri gösteren bir akım şeması Şekil 1.1’de sunulmaktadır.



Şekil 1.1. Plaka ve fayans hattı akım şeması (Göktan ve Güneş, 2006)

Doğal taş üretimi ve işlenmesinde, gerek ocaklarda gerekse fabrikalarda kullanılan birçok yöntem ve ekipman bulunmaktadır. Bunların bazıları geçmişte kalmış olmakla

birlikte birçoğu günümüzde de kullanılmaktadır. Her yöntemin kendine özgü karakteristikleri olmakla beraber diğer yöntemlere nazaran bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Genel olarak ocak ve fabrikalarda kullanılan ilkel yöntemler, basit, kolay ve ilk yatırım giderleri düşük yöntemlerdir; ancak üretim kayıpları fazladır. Mekanik yöntemlerden olan helezon tel ile kesmede üretim kapasitesinin yüksek olması, çalışma esnekliği ve sayalama işlemine gerek olmaması işlemin başlıca avantajları arasındadır. Makinenin ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve elde edilen kesme hızlarının düşüklüğü yöntemin dezavantajları olarak ön plana çıkmaktadır. Ocaklarda yaygın kullanıma sahip olan elmas tel kesme yönteminde ise her türlü yeraltı ve yerüstü doğal taş yapılarının kesimi mümkündür. Yöntem ayrıca diğer yöntemlerle birlikte kullanılabilen olup, büyük boyutlu ve düzgün kenarlı blok kesilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu özelliklerin yanı sıra, düşük ilk yatırım maliyetleri, kısa amorti süreleri, düşük miktarlarda toz ve atık oluşturması, daha az blok kayıpları, yüksek üretim kapasitesi ve diğer modern yöntemlere nazaran daha düşük işletme maliyeti gibi avantajları da bulunmaktadır. Elmas telin sıkışma-kopma olasılığı, kesim öncesinde delik delmeye ve serbest kesim yüzeylerine ihtiyaç duyulması ise yöntemin başlıca dezavantajlarıdır.

Kollu kesiciler ile doğal taş kesimi değerlendirildiğinde ise; çalışma prensiplerinin basit olması, delik delmeye ihtiyaç duymaması, serbest bir yüzeye ihtiyaç duymadan kesim yapabilmesi, iyi kalitede blok üretmesi ve yüksek üretim oranları sağlaması yöntemin önemli avantajları olarak dikkat çekmektedir. Elmas kayış kollu kesici, ilk yatırım ve işletme giderleri bakımından zincirli kollu kesiciye göre daha avantajlıdır. Bunun yanında, elmas kayış kollu kesicide su gereksinimi daha yüksektir ve susuz kesim yapabilmeye olanağı yoktur. Zincirli kollu kesici sert olmayan kayaçlarda suya ihtiyaç duymadan da çalışabilmektedir. Elmas kayış kollu kesicide kullanılan suyun %80'i geri kazanılırken zincirli kollu kesicide suyun geri kazanımı mümkün değildir. Elmas kayış kollu kesici, çatlaklı-boşluklu kayaçlarda verimli kesme sağlarken granit gibi sert kayaçların kesiminde etkili olarak kullanılamaz. İlgili makinelerin kesme derinliklerinin makine kol uzunluklarıyla sınırlı olması ve makinelerin ağırlıklarından dolayı taşıma-kurma işlemlerinin zaman alması diğer dezavantajlarıdır.

Alev ve su jeti ile kesme, ön hazırlık gerektirmeyen yöntemlerdir. Kesici uçlara bağlı olarak görülen ısınma-sıkışma ve aşınma gibi problemler bu yöntemlerde görülmemektedir. Alev jetinin ilk yatırım maliyeti düşük olması önemli bir avantaj

sunmakla beraber, yüksek enerji ihtiyacı ve beraberindeki maliyet, gürültü kirliliği, toz ve gaz oluşumu, düşük kesme verimi, kesilen kayaç yüzeylerinde alterasyon gibi problemler sunmaktadır. Su jeti ise minimum çevresel etkiyle düzgün kesim yapabilmesi, kesim genişliğinin sınırsız olması, kesilen kayaç yüzeylerine zarar vermemesi gibi önemli avantajlar sunmaktadır. Yüksek ilk yatırım maliyetleri ve yüksek miktarda su gereksinimi yöntemin dezavantajları olarak sayılabilir.

Dairesel testere kullanan makineler irdelendiğinde, düşük ilk yatırım maliyetleri, esnek kullanım, düzensiz boyutlu blokların kesiminde yüksek verim ve ekonomiklik, farklı yönlerde kesim esnekliği ve değişik kalınlıklarda plaka kesimi bu makinelerin başlıca avantajları olarak sıralanabilir (Kulaksız, 2012). Kesim için soğutma suyu ihtiyacı, testere çapına bağlı olarak sınırlı kesme derinliği, büyük boyutlu bloklarda uygulama olanağının olmaması ve gürültü kirliliği gibi özellikler bu makinelerin başlıca dezavantajları olarak sayılabilir.

Yukarıdaki bölümden de anlaşılacağı üzere, doğal taş üretim ve işlemede uygun yöntem ve ekipmanın seçimi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörler arasında; ilk yatırım ve işletme maliyetleri, üretilecek doğal taşın özellikleri (fiziksel, mineralojik ve mekanik), doğal taş yatağının konumu ve çeşitli özellikleri, son ürünün kullanım amacı gibi çeşitli durumlar vardır. Uygun ekipman ve yöntem seçimi yukarıda bahsedilen özelliklerin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesiyle mümkün olacaktır.

#### **1.4. Su Jeti ile Kesme**

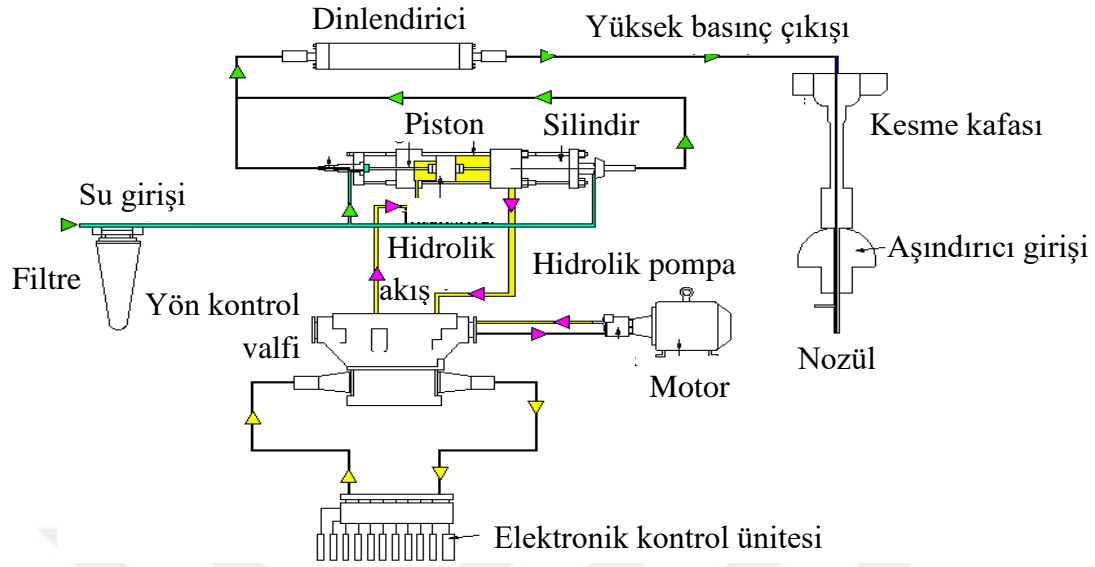
Su jeti, sunduğu çeşitli avantajlarından ötürü günümüzde endüstride çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Kesim işlemlerinin yanı sıra dekoratif yüzey işleme gibi amaçlarla da kullanılabilir. Yüksek basınç koşullarında dar bir memeden (nozül) yüksek hızla geçen su demetinin malzeme yüzeyine çarptırılmasıyla yüzeyden malzeme uzaklaştırılması mantığına dayanan su jetleri, saf ve aşındırıcı su jeti olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Saf su jetlerinde yalnızca su kullanılırken aşındırıcı su jetlerinde suya ilave olarak aşındırıcı malzemeler kullanılmaktadır. Saf su jetleri gıda, plastik ve kereste gibi yumuşak malzemelerin kesilmesinde ve işlenmesinde kullanılırken aşındırıcı su jetleri cam, metal ve kayaç gibi sert malzemelerin kesilmesinde ve işlenmesinde kullanılmaktadır (Karakurt, 2011).

### 1.4.1. Su Jeti'nin Tarihçesi

Suyun aşındırma etkisinden yararlanarak malzemelerin parçalanması eski zamanlardan beri bilinen bir gerçektir. 1800'lerde özellikle Sovyet Rusya ve Yeni Zelanda'da uygulanan hidrolik madencilik su jetinin ilk uygulamaları arasında yer almaktadır. Hidrolik madencilikle beraber basınçlı su ilk defa aşındırma ve kesme amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntem kullanılarak genellikle kömür ve benzeri düşük sertliğe sahip malzemeler basınçlı su kullanarak kesilmekteydi. 1933 yılında bir kağıt şirketi, diyagonal olarak hareket eden bir su jeti huzmesini yatay hareket eden kağıtları kesmede kullanmıştır (Fourness ve Pearson, 1935). Su jetine aşındırıcı katma fikri ilk olarak 1935'lerde ortaya atılmıştır. Aşındırıcı ve suyun karışımı püskürtülerek aşındırma ortamı sağladığı ilk meme 1937'de üretmiştir (Tirrell, 1939). 1956 yılında, plastik ve kağıt gibi yumuşak malzemeleri şekilli olarak kesebilen basınçlı bir su jeti geliştirmiştir (Johnson, 1956). 1958 yılında, çelik gibi yüksek dayanımlı alaşımları kesmek için 690 MPa basınca sahip yüksek hızlı akışkan jeti geliştirilmiştir (Schwacha, 1958). 1962 yılında bir kimyasal üretim şirketi metal, kayaç ve diğer sert malzemeleri kesmek için 340 MPa basınçlı darbeli su jeti kullanmıştır (Rice, 1965). Leach ve Walker (1966) ise çalışmalarında kömür kesiminde yaygın olarak kullanılan geleneksel su jetini geliştirerek ideal su memesi şeklini belirlemeye çalışmışlardır. 1971 yılında korund orifisli, 0.002 inç (0.051 mm) çaplı su jeti nozülü geliştirilerek patenti alınmıştır (Franz, 1971). Yine 1971 yılında, bir otomotiv şirketi, su jetinin ağzına (orifis) korund kristali yerleştirerek dayanıklılığının iyileştirilmesi adına çalışmalar yürütmüştür (Chadwick vd., 1973). Hashish ve arkadaşları, 1987 yılında aşındırıcılı su jetine yönelik yaptıkları tasarımın patentini almış ve ürünü geliştirmeye devam etmişlerdir. Geliştirilen bu su jetinin günümüzde dünya çapında 50'den fazla endüstride uygulaması bulunmaktadır. Su jeti operasyon ömrünü arttıran tungsten karbür (WC) kompozit tüpten üretilen dayanıklı nozül ve yüksek basınca dayanıklı karıştırma tüpü bu ekibin teknolojiye kazandırdığı önemli yenilikler arasındadır.

### 1.4.2. Su Jeti Kesme Makinesi ve Bileşenleri

Bir aşındırıcılı su jeti sistemini oluşturan parça ve bileşenler Şekil 1.2'de sunulmaktadır. Şekil 1.3'te ise ASJ makinesinin genel bir görünümü verilmektedir.



Şekil 1.2. Aşındırıcılı su jeti sisteminin şematik görünümü (Kartal, 2015)



Şekil 1.3. ASJ makinesi ve bileşenleri (URL-3, 2016)

ASJ makinesi genellikle; kesim için ihtiyaç duyulan yüksek basıncı sağlayan bir pompa, aşındırıcı ve suyun karıştırıldığı karıştırma odası, aşındırıcılı suyun içinden geçtiği bir kesme memesi (nozül) ve hidrolik sistem, borular, bilgisayar kontrol sistemi ve kontrol paneli gibi bazı bileşenlerden meydana gelir.

Basınç ünitesinde, bir pompa yardımıyla sürekli ve sabit yüksek basınçlı bir akış sağlanır. Su jetinde kullanılacak suyun belli kriterlere sahip olması gerekmekte olup bu

kriterler Tablo 1.1’de sunulmaktadır. Bu kriterlere uygun olmayan suların gereksinimleri sağlanması açısından zenginleştirilmesi gerekmektedir (Ergür, 2007).

Tablo 1.1. ASJ ile kesmede kullanılacak su için önerilen kalite değerleri (Tikhomirov vd., 1992; Ergür, 2007)

Özellik	Değer
Toplam çözünmüş katılar	< 500 mg/lt
Sertlik	< 25 mg/lt
Florür	< 250 mg/lt
Demir	< 250 mg/lt
Manganez	< 0,2 mg/lt
Klor	< 0,1 mg/lt
Bulanıklık	< 5 NTU
pH	6,5-8,5

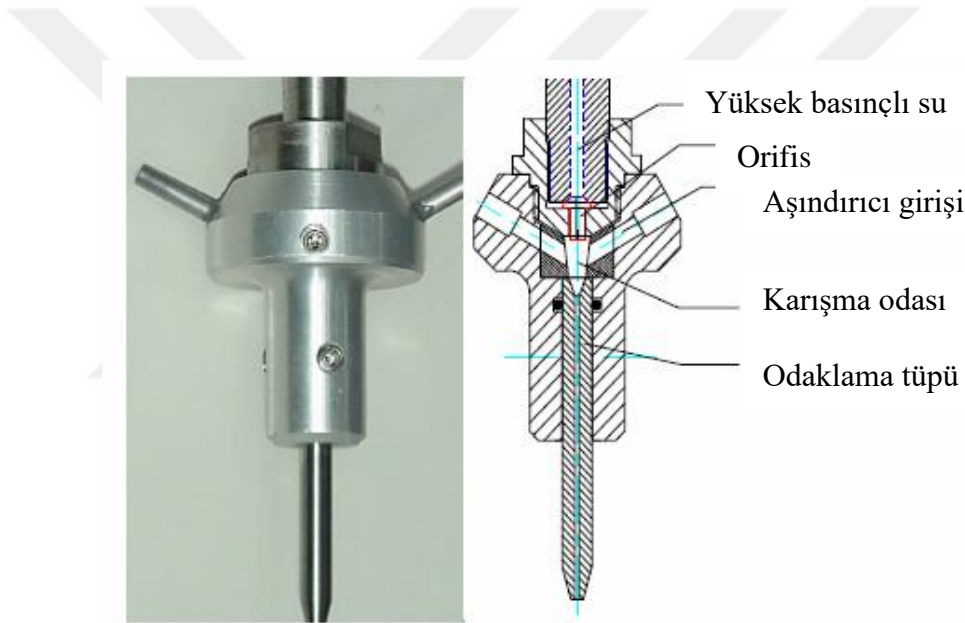
ASJ yönteminde fonksiyonel olarak doğrudan pompalar kullanılabileceği gibi hızlandırıcı esaslı pompalar da kullanılabilir. Doğrudan tahrikli pompalar pistonların gücünü doğrudan elektrik motoru milinden alırlar. Bu pompalar, akışkan basıncının en fazla 300 MPa olması istenilen durumlarda kullanılabilir. Basınç dalgalarının düşük olması ve bakım gereksinimlerinin az olması önemli avantajlarıdır. Hızlandırıcı esaslı pompalar ise yüksek basınçlar elde etmek için kullanılırlar. Bu pompalardaki sistemler hidrolik yağ ve su çevrimlerini içermektedir. Hidrolik yağ basıncı ile su basıncının yükseltilmesi sistemin ana felsefesidir (Kartal, 2015). ASJ yönteminde basınç, ihtiyaca göre 150-700 MPa arasında sağlanabilmektedir.

ASJ yönteminde, basıncı arttırılan su, basınca dayanıklı ve kesme kafası hareketine uyum sağlamak adına yeterince esnek olan borular yardımıyla kesme kafasına taşınmaktadır (Karakurt, 2011). Kesme kafasına ulaşan su elmas ya da safirden yapılmış orifis denilen dar bir ağız içinden geçirilerek karıştırma odasına gönderilir. Orifis çapı 0,18-0,40 mm arasında değişir.

ASJ ile kesme yönteminde, kesme için gerekli olan aşındırıcı tanelerin sisteme beslenmesi aşındırıcı ünitesinde gerçekleştirilir. Aşındırıcı miktarının ölçülebildiği bir aşındırıcı haznesi, aşındırıcının içinden geçtiği hortum ve karışım odasından oluşan bu sistemin olabildiğince nozüle yakın olması istenir. Nozülün hemen üzerinde yer alan bu kısımda aşındırıcı ve orifisten gelen su karışır. Bu karışım daha sonra ihtiyaç duyulan

hızların eldesi için odaklama tüpüne girer. Genelde tungsten karbürden üretilen odaklama tüpü, ASJ için oldukça önemli bir parçadır ve planlanan işe göre boyutlarının hassas olarak hesaplanması gerekir. ASJ sistemlerinde kullanılan aşındırıcılar genellikle 0,1-0,3 mm boyutlarında ve orta sert-sert malzemelerden seçilmektedir. Yöntemde, aşındırıcı besleme hızları 100-500 gr/dak aralığında tercih edilir.

Püskürtme memesi (nozül) (Şekil 1.4), yüksek basınçlı akışkanın malzeme üzerine püskürtüldüğü yerdir. Gerçekleştirilecek işlemin niteliğine göre farklı boyut ve çaplardaki nozüller değişik malzemeler kullanılarak üretilebilmektedirler. Karışma odası ve odaklama tüpü, nozülün içinde yer alan parçalardır ve nozül çapları genellikle 0,5-3 mm arasında değişmektedir.



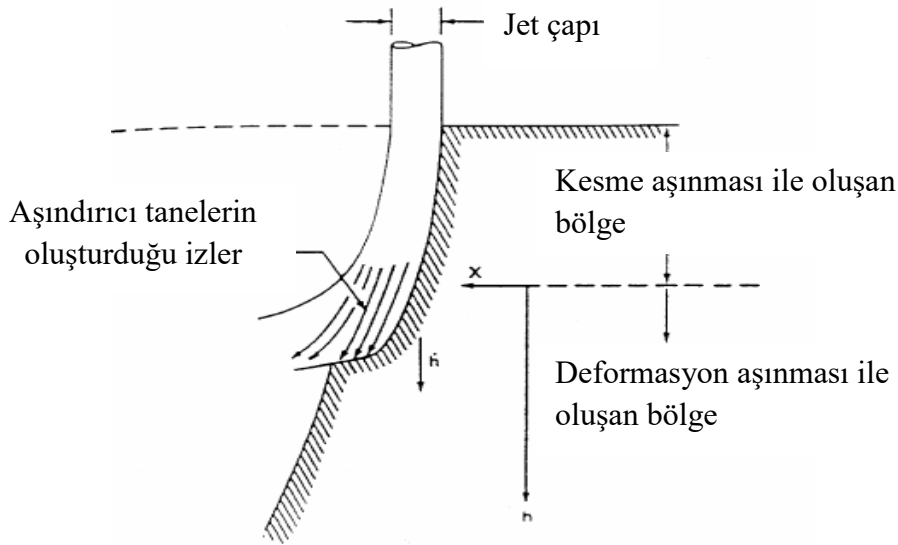
Şekil 1.4. ASJ'de kullanılan tipik bir nozül (Pi, 2008)

Kesme kafasının hareketi, harici yağlanabilen hassas boşluksuz lineer kızaklardan oluşan ve şasi içerisindeki körüklerle korunaklı hareket sistemi tarafından sağlanmaktadır (Ergür, 2007). Nozülden çıkan yüksek basınçlı suyun malzemeye ve çevreye zarar vermemesi için sistemde bir de çalışma tezgahı bulunmaktadır. Kesilecek numune bu tezgah üzerine, nozül ile belirli bir mesafede yerleştirilir. Tezgahın içerisinde genelde ince ve dikey duran metal saclar bulunur. Geri dönüşümün mümkün olduğu durumlarda tezgah altlarında aşındırıcı su biriktirilmektedir. Sistemde bir de elektronik kontrol ünitesi bulunmaktadır ve bilgisayarda programlanan kesim planı, kontrol paneliyle uygulanmaktadır.

### 1.4.3. Su Jeti ile Kesmenin Temel Esasları

ASJ ile kesme, nozülde çıkıp malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı ve su karışımının malzeme yüzeyini aşındırmasıyla gerçekleşmektedir. Bu işlem akışkanla aşındırma olarak isimlendirilmektedir ve kesme sırasında aşındırılan malzeme miktarı, akışkanın kinetik enerjisiyle doğru orantılıdır. Kesilen malzemenin çeşidi ve sahip olduğu özellikler, kesme mekanizması üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Aşındırıcı tanecikler içeren su huzmesi, malzeme üzerinde yüzeyden derine doğru daralan bir kesiğe neden olmaktadır.

ASJ ile kesmede, kesilen malzeme üzerinde kesme ve deformasyon aşınması olmak üzere iki farklı malzeme uzaklaştırma mekanizması etken olmaktadır (Şekil 1.5). Kesilen yüzeyler üzerinde gözlenen deformasyon tipine bağlı olarak ilgili bölümler kesme aşınma ve deformasyon aşınma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Kesme aşınma bölgesinde, akışkan kesim yüzeylerine düşük açılarla çarpıp erozyon mekanizmasıyla malzeme uzaklaştırmaktadır. Bu bölge, küçük kavisli ve pürüzlülüğü az yüzeylere sahiptir. Deformasyon aşınması bölgesinde ise kinetik enerjisi azalan akışkan daha yüksek açılarla kesim yüzeyine çarpmakta ve beraberinde daha pürüzlü ve dalgalı yüzeyler meydana getirmektedir.



Şekil 1.5. ASJ ile kesmede kesme ve deformasyon aşınma bölgeleri (Coşansu, 2010)



ASJ kesme yönteminde, aşındırıcıların kinetik enerjilerinde meydana gelen değişimlerin kesme yüzeylerinde görülen özellikler (pürüzlülük ve dalgalanma gibi) üzerinde rol oynadığı söylenebilir.

#### 1.4.4. Su Jeti Kesme Parametreleri

Su jeti kesme yönteminde kesme performansını etkileyen ve kesme performansını gösteren çeşitli parametreler bulunmaktadır. Performans göstergeleri olarak kesme genişliği, kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü ve kerf geometrisi önemli kriterler arasındadır. Jet basıncı, kesme hızı, meme-örnek mesafesi ve aşındırıcı besleme miktarı, kesme performansını etkileyen başlıca parametrelerdir. Ayrıca, kesilen malzemenin özellikleri ve kesmede kullanılan aşındırıcının tipi, şekli ve boyutu da kesme performansı üzerinde önemli etkiye sahiptir.

Kesme derinliği, ASJ ile kesme yönteminde kesme performansını belirleyen en önemli göstergelerden birisidir. Kesim yüzeyi ile kesilen malzemenin içine doğru oluşan boşluğun (kesiğin) en dip noktası arasındaki dikey mesafe toplam kesme derinliği olarak tanımlanmaktadır. Kesme derinliğinin yanında aşınma-deformasyon bölgesi derinliği ve bu derinliğin toplam derinliğe olan oranı da kesme performans değerlendirmesi açısından önem arz etmektedir. Kesim yüzeyinin üst bölgesinden deformasyon-aşınma bölgesinin üst sınırına (kesme-aşınma bölgesinin alt sınırı) kadar olan dikey mesafe kesme-aşınma bölgesi derinliği olarak tanımlanmaktadır. Kesme derinliğinin ve kesme-aşınma bölgesi derinliğinin artması iyi bir kesme performansına işaret etmektedir. Bir diğer performans göstergesi de kesme genişliğidir. Kesiğin genişliğinin az olması daha az malzeme kaybı açısından istenilen bir durum olmakla birlikte kesme performansının değerlendirilmesinde bu çıktının kesme derinliğiyle beraber değerlendirilmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Kesme genişliği genelde nozül çapının 2-3 katı kadardır. Diğer bir performans göstergesi olan yüzeylerin pürüzlülüğü de kesme performansını belirleyen kriterler arasındadır. Yüzey pürüzlülüğü, akışkan-malzeme etkileşiminin belirlenmesi ve bu etkileşimin yüzeyde meydana getirdiği tahribatların değerlendirilebilmesi açısından önem arz etmektedir. Ayrıca, pürüzlü yüzeylerin düzeltilmesi için ikincil işlemlere ihtiyaç duyulacağından daha düşük pürüzlülüğe sahip yüzeylerin eldesi istenen bir durumdur.

Kesme performansını etkileyen önemli parametrelerden olan odaklama tüpü ve orifisin çapı, kesilen numuneden malzeme uzaklaşma oranını etkilemektedir. Akışkan

içindeki aşındırıcıların hızı, aşındırıcı-su karışımının yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Odaklama tüpünün çapının artmasıyla beraber akışkan yoğunluğu azalmakta ve bu da aşındırıcı parçacık hızını düşürmektedir. Odaklama tüpü çapının çok düşük olması durumunda ise aşındırıcı parçacıkları birbirleriyle ve nozül duvarıyla etkileşmekte ve sonuç olarak parçacık hızı düşmektedir. Dolayısıyla, parçacıkların daha yüksek hızda hareketini ve yüksek kinetik enerji eldesini sağlayan bir odaklama tüpü çapı belirlemek gerekmektedir. Odaklama tüpü çapının orifis çapına oranının 3-4 arasında olması önerilmektedir (Pi, 2008; Blickwedel, 1990).

Nozül uzunluğu kesme performansını etkileyen diğer bir parametredir. Akışkanın düzgün bir şekilde ivmelenmesine olanak sağlayan belirli bir nozül uzunluğuna kadar, kesme derinliği lineer olarak artmaktadır. Kritik bir uzunluğun ötesinde ise artan sürtünmeye bağlı olarak parçacık hızı ve kesme derinliği düşmektedir. Dolayısıyla optimum bir nozül uzunluğu belirlenmesi gerekmektedir. Bu uzunluk ayrıca kullanılacak aşındırıcı yoğunluğuyla da artmaktadır. Optimum nozül uzunluğunun, odaklama tüpü çapının 25-50 katı olması önerilmiştir (Blickwedel, 1990). Pratik olarak uzun nozülün, kesme performansı ve nozül ömrünü arttırdığı kabul edilmektedir. Piyasada genellikle 70-100 mm uzunluğunda nozüller kullanılmakla beraber aşınma, maliyet ve kullanım ömrü açısından 76 mm'lik nozüllerin kullanılması önerilmektedir (Pi, 2008).

Kesme derinliğini etkileyen önemli parametrelerden bir diğeri de jet basıncıdır (pompa basıncı). Genel olarak basınç arttıkça kesme derinliği de artmaktadır. Bir malzemenin kesilmeye başlaması için gerekli olan en düşük basınç değerine eşik basınç denilmektedir. Bu değer, diğer kesme parametrelerine ve kesilen malzemenin özelliklerine bağlı olarak farklılık arz etmektedir (Summers, 1995). Kullanılabilecek maksimum basınç değeri başlıca makine motor gücüne ve pompa özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Kesilen malzeme özelliklerine ve diğer etmenlere bağlı olarak 700 MPa'a kadar çıkabilen basınç değerlerinde kesim yapılabilmeyle beraber genel olarak 150-400 MPa'lık basınç değerlerinde kesimler gerçekleştirilmektedir.

Meme-örnek mesafesi nozülün uç kısmı ile kesilen malzeme arasındaki dikey mesafe olarak tanımlanmaktadır. Bu mesafe genelde 1-5 mm değerinde olup artışıyla birlikte kesme derinliği azalmakta ve kesme genişliği artmaktadır. Ayrıca kesim yüzeylerinin kalitesi de bozulmaktadır (Karakurt, 2011).

Kesme hızı da kesme kalitesi için bir diğer önemli parametredir. Kesme hızı, kesme kafasının malzeme üzerinde kesim hattı boyunca ilerleme hızı olarak tanımlanmaktadır. Bu

değer, malzeme yüzeyine yüksek basınçta gönderilen akışkanın ilgili yüzeye temas etme süresini ve miktarını kontrol etmektedir. Su jeti huzmesinin malzemede neden olduğu kesiğin büyük bir kısmı genellikle ilk 5 milisaniye içerisinde gerçekleşmektedir (Summers, 1995). Kesme hızı yaygın olarak 100-200 mm/dak olarak tercih edilmektedir.

Aşındırıcı besleme miktarı da kesme performansını etkileyen bir başka parametredir. Kesme derinliği, aşındırıcı besleme miktarındaki artışın belirli seviyesine kadar artmakta, bu seviyeden sonraki artışlarda ise azalma eğilimi göstermektedir. Optimum aşındırıcı besleme miktarının belirlenmesinde; su basıncı, orifis ve nozül özellikleri (çapı ve uzunluğu) gibi parametreler göz önüne alınmalıdır. Aşındırıcı besleme miktarı genellikle 250-600 gr/dak'dır.

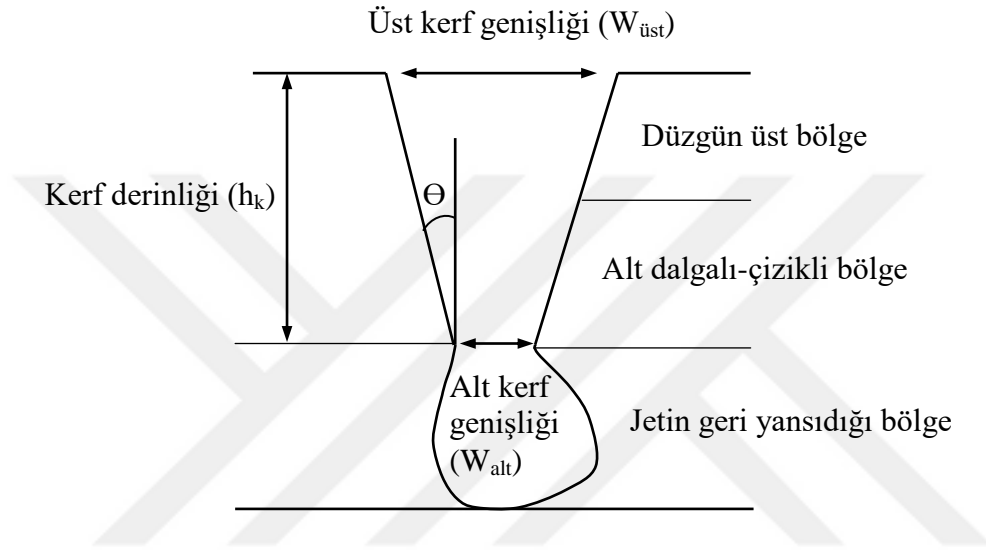
Kesme performansı üzerinde etkiye sahip bir diğer parametre ise aşındırıcı boyutudur. Aşındırıcı boyutunun artmasıyla birlikte tanelerin sahip olduğu kinetik enerji artacağından daha yüksek kesme derinliklerinin elde edilmesi mümkündür. ASJ yönteminde, genellikle 100-400 µm boyutunda aşındırıcılar kullanılmaktadır. Bu değer aralığı dışındaki aşındırıcılar nozül tıkanmasına ve düşük kesme performansı elde edilmesine yol açmaktadır. Aşındırıcıların sertlik, yoğunluk, kırılgenlik, köşelilik gibi özellikleri de kesme performansını etkilemektedir. Kesme performansı, genel olarak sertlik, yoğunluk ve köşeliliğin artması ile iyileşmekte, kırılgenliğin artması ile de kötüleşmektedir.

Kesilen malzemenin sertliği, dayanım özellikleri ve yapısı gibi çeşitli özellikleri de kesme performansını ve kesim mekanizmasını etkileyebilmektedir. Kesilen malzemenin gevrek, sünek ya da kırılgen olup olmaması, basma-çekme dayanımı, süreksizlik içeriği, mineralojik yapısı gibi özellikler farklı kesme parametre değerleri seçimini doğurabilir. Kesiğin oluşma mekanizması olarak değerlendirildiğinde, granit gibi sert kayalarda mineral tane sınırları boyunca gelişen mikro çatlak ağının etkisi görülürken mermer gibi nispeten daha yumuşak ve homojen kayalarda ise plastik akma şeklinde bir malzeme uzaklaşma mekanizması gerçekleştiği söylenebilir (Momber 2006; Karakurt 2007).

#### **1.4.5. Su Jeti ile Kesmede Kerf ve Yüzey Karakteristikleri**

ASJ ile kesim işlemlerinde, işlem parametrelerine göre değişen değerlerde bazı kerf (yarık) karakteristikleri oluşur. Kesme performansını gösteren önemli göstergeler olarak kabul edilen bu parametreler; kerf açısı, kerf derinliği ve genişliği, yüzey dalgalılığı ve

pürüzlülüğüdür. ASJ ile kesimde oluşan yarığın (kerf) formu, işlemin performansını belirten ana göstergelerden birisidir. Yarığın formu çok kompleks olmasına karşın basitçe iki ayrı açılı bölgeye ayrılabilir. Bunlar kesme aşınması ve deformasyon aşınması bölgeleridir. Kerf profilinde karakteristik parametreler kerf açısı ( $\Theta$ ), kerf genişliği ( $W$ ) ve kerf derinliğidir ( $h$ ). Tipik bir kerf geometrisi Şekil 1.6'da gösterilmektedir.  $W_{üst}$  ve  $W_{alt}$  sırasıyla alt ve üst kerf genişliğini ifade etmektedir.



Şekil 1.6. Su jeti ile kesimde kerf profili şematik gösterimi (Liu, 2004)

ASJ ile kesimde basınçlı akışkan, malzemenin yüzeyinden içine doğru genişliği azalan bir yarık oluşturur. Dolayısıyla kesimde, diklikten bir sapma meydana gelir. Bu eğime kerf açısı ( $\Theta$ ) denilir. Bu eğimin alt sınırı kesme-aşınma bölgesi sınırı olarak kabul edilir. Yarığın üst kesimlerinde kesim yüzeyinde düzgün bir yüzey oluşurken, derinlere doğru çizikli bir yüzey meydana gelir. Kerf açısı aşağıdaki eşitlikle hesaplanır (Wang ve Guo, 2003):

$$\Theta = \tan^{-1} [(W_{üst} - W_{alt}) / 2 h_k] \quad (1.1)$$

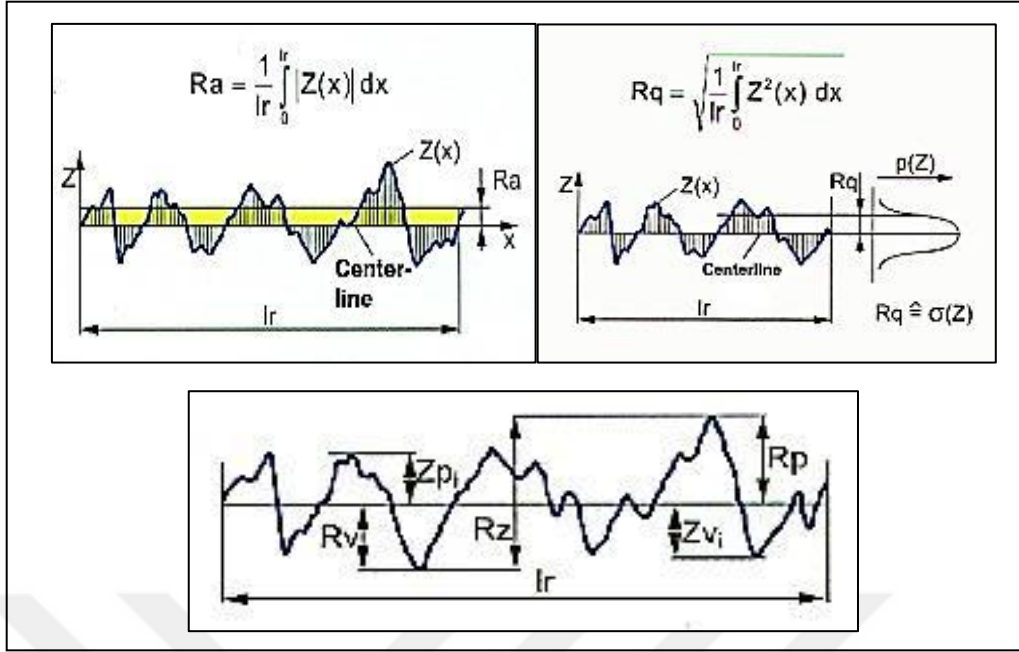
Kerf açısı, birçok parametrenin etkisi altındadır ve bu açıyı sıfıra indirmek imkansızdır. Literatürde, kerf açısının etkilendiği kesme parametrelerine göre değişimi incelenmiş ancak matematiksel bir bağıntı elde edilememiştir. Genel eğilim olarak, kesme hızı ve meme-örnek mesafesindeki artışa bağlı olarak daha yüksek kerf açıları elde

edilmektedir. Kerf açısı, jet basıncının belirli değerlerine kadar artmakta sonrasında ise azalma eğilimi göstermektedir. Malzeme özellikleri ve kesme kalınlığı da kerf açısını etkileyen özellikler arasındadır (Maros, 2012).

ASJ ile kesmede, daha önce de belirtildiği gibi kesimde oluşan yarık kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgesi olmak üzere iki farklı bölgeden oluşmaktadır. Kesme-aşınma bölgesinde yüzeyler nispeten daha düzgün iken deformasyon-aşınması bölgesinde dalgalı yüzeyler (çukurlar-tümsekler) oluşmaktadır. Aşındırıcı-su karışımının kesme derinliği boyunca azalan kinetik enerjisinin ve beraberinde oluşan türbülansların bu pürüzlülüğe neden olduğu düşünülmektedir (Karakurt, 2011). Yüzey karakteristikleri birçok bağımsız parametrenin etkisi altındadır. Yüzey karakteristikleri; pürüzlülük ve dalgalılık olarak iki farklı kategoride değerlendirilebilir. Yüzey dalgalılığı, geniş düzensizliklerle belirgindir ve kesme için gerekli enerjinin yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Xu, 2005). Yüzey pürüzlülüğü ise yüzeyin mikron düzeyindeki çukur-tümsek profiliyle ilgilidir. Yüzey karakteristikleri genellikle jet basıncının artmasıyla iyileşmekte fakat sınır bir değerden sonra kötüleşme eğilimi göstermektedir. Ek olarak, yüzey karakteristikleri, kesme hızı ve meme-örnek mesafesinin artışı ile kötüleşirken aşındırıcı besleme miktarı artışıyla iyileştirmektedir (Xu, 2005).

Yüzey pürüzlülüğünü ifade etmek için çeşitli parametreler bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları Aritmetik Ortalama Pürüzlülük ( $R_a$ ), Kuadratik Ortalama Pürüzlülük ( $R_q$ ), ve Maksimum Pürüzlülük Derinliği'dir ( $R_z$ ) (Şekil 1.7). DIN EN ISO 4287 standardında, bu değerleri belirlemek için piyasada çeşitli cihazlar bulunmaktadır. Bu cihazlar genellikle kesme-aşınma bölgesinde yatay bir hatta birkaç mm uzunlukta alanı tarayarak yüzeyin profilini çıkarmakta ve R değerlerini hesaplamaktadır.

$R_a$  değeri, yüzey pürüzlülük profiline karşılık gelen y-koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. İstatistiksel olarak değerlendirilirse,  $R_a$  aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün y-koordinatlarının merkez hattında (center-line) ortalama aritmetik sapmasını tanımlar. Y-koordinatlarının kuadratik ortalama değeri ise  $R_q$ 'yu vermektedir.  $R_q$  veya yüzey profilinin y-koordinatlarının merkez hattından ortalama kuadratik sapması, profilin ordinatlarından standart sapmayı, yani verilen alana dağıtılmış profil çıkıntıları ve boşluklarındaki standart sapmayı ifade eder.  $R_q$  değeri  $R_a$ 'dan daha büyüktür.  $R_z$  ise, yüzey pürüzlülük profilinin verilen ölçü bölümündeki en yüksek profil tepesinin ( $R_p$ ) yüksekliği ile en derin profil koyağının ( $R_v$ ) derinliği arasındaki dikey mesafenin ölçülmesiyle elde edilen bir değerdir (URL-16, 2016).



Şekil 1.7. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm parametreleri (URL-4, 2016)

#### 1.4.6. Su Jeti ile Kesmenin Diğer Yöntemlerle Karşılaştırılması

Su jeti kesme yöntemi diğer yöntemlerle kıyaslandığında sahip olduğu özelliklerle ön plana çıkmaktadır. Aşağıda, geleneksel ve geleneksel olmayan diğer yöntemler ile su jeti yönteminin çeşitli yönlerden karşılaştırılması yapılmıştır (Karakurt, 2007; Pi, 2008; Karakurt, 2011; İnal, 2011; Kulaksız, 2012).

Su jeti yönteminin avantajları:

- i. Geniş skalada malzeme kesimi: Su jeti ile plastik, gıda, kereste ve aşındırıcılı su jeti ile çelik, titanyum, cam, seramik, kayaç vb. gibi çok çeşitli malzemeler üzerinde kesme yapılabilmektedir.
- ii. Farklı şekil ve açılarda kesme yeteneği: Aynı nozül kullanılarak farklı boyutlarda ve farklı açılarda kesim yapılabilmektedir. Özellikle yüzey işleme uygulamalarında, kompleks şekilli işlemlerin yapımında diğer yöntemlere nazaran uygulama kolaylığı sunmaktadır.
- iii. Kesme aracı olarak su kullanımının avantajları: Isıl problemlerin yol açtığı aşınmalar minimum düzeydedir. Kesim yüzeyinde ısı kaynaklı problemler görülmez. Ayrıca kesici uç sıkışması-kopması gibi bir durum da söz konusu değildir.

- iv. Düşük kesme kuvveti gereksinimi: Su jeti oldukça düşük kuvvetlerde çalışabildiğinden enerji tasarrufu sağlayabilmektedir.
- v. Çevresel etkilerinin minimum olması: Kesme esnasında yangın riski düşük olup toz veya insan sağlığını etkileyecek herhangi bir gaz oluşumu görülmez. Gürültü düzeyi, dairesel testerele göre daha düşüktür.
- vi. Montaj kolaylığı: Su jetinin kurulması, taşınması ve sökülmesi kolaydır. Sistem bileşenleri diğer sistemlere göre hafiftir ve birbirlerine entegreleri kolaydır.
- vii. Düzgün ve istenilen boyutta kesim: Kesim hatlarındaki sapmalar diğer yöntemlere göre çok az olduğundan düzgün plaka ve bloklar elde edilir. Kesme verimi yüksektir.
- viii. Düzgün kesme yüzeyleri: Testere izleri ya da ısıl gerilmelerden kaynaklanan yüzey problemleri görülmez.
- ix. Otomatik çalışma: Su jeti, kolaylıkla programlanabilen ve otomatik çalışan bir teknolojidir. Dolayısıyla, sürekli bir operatör kontrolüne ve kalifiye iş gücüne ihtiyaç duyulmaz.
- x. Aşındırıcı tekrar kullanımı: Kullanılan aşındırıcıların geri kazanımı ve tekrar kullanımı mümkündür. Geri kazanım, aşındırıcı maliyetlerini düşürmekte ve beraberinde işletme maliyetlerini de etkilemektedir.

Su jeti yönteminin dezavantajları:

- i. Maliyet: Su jetinin ilk yatırım maliyeti yüksektir.
- ii. Sınırlı kesme derinliği: Su jeti kesme yöntemi çok kalın malzemelerin kesiminde verimli olarak kullanılamaz. Kesme derinlikleri sınırlıdır ve kesimin belirli bir derinliğinden sonra yüzey kalitesi düşmektedir.
- iii. Kerf profili: Su jeti kesiminde oluşan yarıklar, kendine özgü eğimli ve derine doğru kalitesi bozulan yüzeylere sahiptir. İlgili yüzeylerin düzeltilmesi için ikincil işlemlere ihtiyaç vardır.

#### **1.4.7. Su Jeti'nin Kullanım Alanları**

Su jeti yöntemi geçmişten günümüze birçok farklı alanda kullanım alanı bulmuştur. Saf su jetleriyle düşük sertlikteki malzemelerin kesimi yapılırken aşındırıcılı su jetleriyle sert malzemelerin de kesimi yapılmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Su jeti ile kesilerek hazırlanmış çeşitli ürünler (URL- 5, 2016)

Su jeti yönteminin uygulama alanları aşağıda sunulmaktadır (Külekçi, 2002; Akkurt, 2004, Karakurt vd., 2010).

Saf su jetleri:

- i. Plastiklerin kesilmesi: Kalıp endüstrisindeki mühendislik plastikleri, yerli kullanım için parça endüstrisi, film endüstrisi, kablo vb. kesimi
- ii. Kağıt ve kağıt hamurunun kesilmesi: Oluklu kağıt, çocuk bezi ve diğer sağlıkla ilgili kağıt kesimi, atık kağıt geri dönüşümü
- iii. Fiber ve kumaş kesilmesi: Fiber ve spor malzemeleri endüstrisi, giyim endüstrisi
- iv. Kauçuk ve deri kesilmesi: Kauçuk, deri ve suni deri endüstrisi, ayakkabı endüstrisi
- v. Gıda ve donmuş yiyeceklerin kesilmesi: Gıda endüstrisi
- vi. Kereste ve kontrplak kesilmesi: Ormancılık, kereste endüstrisi, ev yapım endüstrisi, iç dekoratif uygulamalar
- vii. Diğer: Patlayıcı endüstrisi, asbest malzemelerin kesilmesi, katı yakacakların kesilmesi, buz kırıcı

Aşındırıcı su jetleri:

- i. Metalik yaprak kesme, titanyum, alüminyum, paslanmaz çelik, süper alaşımlar: Havacılık, otomobil, gemi inşa ve demir endüstrisi, köprü imalatı, metalik ürün üretimi
- ii. Tel, puslu, laminantlı cam kesilmesi: Cam ve ev yapım endüstrisi, iç dekorasyon, tıbbi cihazların üretimi
- iii. Gelişmiş malzemeler, kompozit malzemeler, seramikler, mıknatıslı malzemeler: Seramik endüstrisi, elektronik parçalar endüstrisi, optik fiber endüstrisi



- iv. Beton, takviye beton, çimento harcının kesilmesi: İnşaat endüstrisi, demontaj, ev yapım endüstrisi
- v. Kayaç, doğal taş, kömür kesilmesi: Madencilik endüstrisi, taş ocakçılığı, kömür madenciliği, seramik endüstrisi, bahçecilik
- vi. Hurda parça: Hurda parça kesim ve taşıma
- vii. Diğer: Çapak alma ve temizleme, boya kaplama ve kazıma, deliklerin temizlenmesi vb.

Madencilikte; kömür madenciliği, doğal taş kesme ve işleme, boyut küçültme, delik delme ve tünel açma uygulamalarında su jeti kullanılmaktadır. Kömür madenciliğinde hidrolik kazı yönteminde su jeti başarıyla kullanılmaktadır. Hidrolik madencilik, bilinen diğer maden işletme yöntemleriyle üretilemeyen çok ince ya da çok kalın kömür damarlarından üretim yapılabilmesi açısından önemli bir avantaj sağlar. Yöntemde ayrıca metan patlama riski ve toz emisyonu sorunu da en aza indirgenmektedir (Karakurt vd., 2010). Su jeti kesme yönteminin madencilikteki en önemli kullanım alanlarından birisi de önceki bölümlerde bahsedilen doğal taş kesme ve işleme endüstrisidir. Ocaklarda ve fabrikalarda, diğer yöntemlerle birlikte ya da tek başına kullanım olanağı sunan yöntem, diğer ekipman ve yöntemlere göre birçok avantaja sahiptir. Su jeti teknolojisi delik delme ve tünel açma işlemlerinde de kullanılabilir. Delme işlemi sadece su jeti ile yapılabildiği gibi, su jeti ve mekanik delici kombinasyonunun da uygulanabilmesi mümkündür. Mekanik delicilerle kombine olarak çalışan su jetleri, delme verimini önemli ölçüde arttırmaktadır. Su jeti teknolojisinin madencilikteki diğer bir kolu da boyut küçültmedir. Uygulama, sunduğu çeşitli avantajlardan ötürü son yıllarda araştırma ve uygulama alanı bulmuştur. Boyut küçültme işleminde sisteme beslenen malzeme yüksek basınçlı su ile etkileşime geçmekte ve sistem içindeki bir düzeneğe çarpıp parçalanmaktadır (Karakurt vd., 2010).

### **1.5. Aşındırıcılar**

Endüstride, geniş bir yelpazede çeşitli tipte aşındırıcılar farklı amaçlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Kendisinden daha düşük sertlikte bir malzeme ile etkileşime geçtiğinde o maddeden parçalar koparabilen malzemeler aşındırıcı olarak tanımlanabilmektedir. Sertlik, darbeye karşı dayanıklılık, tane şekli ve boyutu aşındırıcının

aşındırma performansını belirleyen temel özelliklerdir. Etkili bir kesme/işleme için aşındırıcı sertliğinin etkileşime geçtiği malzeme sertliğinden yüksek olması gerekir. Aşındırıcıların sertliğinin belirlenmesinde genellikle Mohs, Knoop ve Rockwell sertlik sınıflamaları kullanılır (Onargan, 2006). Sertlikten sonraki en önemli özellik ise darbeye karşı dayanımdır. Elmas gibi çok sert malzemelerin darbeye karşı dayanımları yüksek olmayabilir (Kulaksız, 2012). Aşındırıcılarda tane şekli de önemli bir özelliktir. Aşındırıcılar farklı sistemlerde kristalleştiklerinden değişik şekillerde kırılırlar. Kırılma sonucunda bazılarının uçları küt, bazılarınının ise sivri olmaktadır (Hallaçoğlu, 1999).

### 1.5.1. Aşındırıcı Çeşitleri

Aşındırıcılar çeşitli kriterlerde sınıflandırılabilmesine rağmen en genel kabul görmüş sınıflandırma hammadde özelliklerine göre yapılandırılır. Bazı aşındırıcılar doğadan direkt alınıp ya da madencilik işlemleriyle üretilip kullanılabilirken bazıları da fabrika ortamında yapay olarak elde edilmektedir. Dolayısıyla aşındırıcıları doğal ve yapay olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür.

Kırma, boyutlandırma ve birbirine bağlama dışında hiçbir fiziksel ve kimyasal işleme tabi tutulmamış aşındırıcı mineraller, doğal aşındırıcı olarak adlandırılır. Doğal aşındırıcıların endüstride kullanımı, yapay olanlara göre azalmıştır. Bunun nedeni homojen ve aynı şekillere sahip olmamaları ve safsızlıklar içermeleridir. Doğal aşındırıcıları sertlik temelinde aşağıdaki gibi sınıflara ayırmak mümkündür (DPT, 1995; Kulaksız, 2012).

- i. Çok sert aşındırıcılar (7 Mohs ve üzeri): Elmas, korund, zımpara, stavrolit, garnet
- ii. Orta sert aşındırıcılar (5-7 Mohs): Silika Grubu; çakmaktaşı, kalsedon, flint, novakülit, kuvars, kuvarsit, kumtaşı, silis kumu, diğer; olivin, bazalt, feldspat, granit, mikaşist, perlit, pomza taşı, fırın cürufu
- iii. Düşük sertlikteki aşındırıcılar (5 ve daha az Mohs): Talk, tebeşir, kil, kalsit, apatit, dolomit, diatomit, kireçtaşı, silt, ceviz kabuğu, mısır koçanı vb.

Doğada bulunmayıp, fabrikada üretilen aşındırıcılara yapay aşındırıcılar denilmektedir. Yapay aşındırıcılar, modern endüstri için büyük öneme sahiptirler ve yüksek kaliteli aşındırıcılar sahasında baskın durumdadırlar. Uygulama alanının niteliğine bağlı olarak farklı fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklere sahip aşındırıcılar üretilmektedir (Kulaksız, 2012). Aşağıda bazı özellikleriyle birlikte çeşitli aşındırıcılar sunulmaktadır.

- i. Silisyum karbür: Beyaz silis kumunun toz kömürle dirençli elektrik fırınlarında 2000-2200 °C’de tepkimesinden elde edilir. Kristalleri ince ve sivri uçludur (Hallaçoğlu, 1999). Mohs sertliği 9’dan fazladır ve kendi kendini bileme özelliğine sahiptir.
- ii. Sentetik korund: Bu malzeme de elektrik fırın ürünü aşındırıcılardandır. Boksitin elektrik ark fırınlarında 1900-2100 °C’de eritilmesiyle elde edilmektedir. Mohs sertlikleri 9 civarındadır. Alüminyum Oksitler, kimyasal yapısı ve kristalleşme şekli bakımından normal korund, yarı asil korund, asil korund gibi çeşitli tiplerde üretilir (Hallaçoğlu, 1999).
- iii. Yapay elmas: Grafitin 50-60 kbar basınç ve 1400 °C sıcaklıkta; demir, nikel ya da kobalt gibi metalik bir çözücüyle sentezlenerek hegzagonal kristal yapının kübik yapıya dönüştürülmesiyle elde edilir. Doğal elmasla aynı fiziksel özelliklere sahip olup daha da saf ve homojendir.
- iv. Bor karbür: Elmastan sonraki en sert aşındırıcı maddedir. Borik asit ve kok yapısındaki karbon karışımından elektrik ark fırınlarında veya rezistans fırınlarında yaklaşık 2600 °C’de elde edilmektedir.
- v. Cam: Kırılıp elenerek cam granül şeklinde kullanılabilirdiği gibi fırında bilye formu kazandırılarak cam küreler şeklinde elde edilebilir. Cam atıkların da aşındırıcı olarak değerlendirilebileceği düşünülerek doğal aşındırıcı gibi de ele alınabilir. Mohs sertlikleri 5,5-7 arasında değişmektedir.
- vi. Metal tozları: Çelik ve pirinç gibi metallerin tozları ve parçaları da aşındırıcı olarak kullanılabilir. Kesme teller, metalik yünler, granüller ve küreler gibi farklı formlarda üretilmektedirler.
- vii. Diğer: Bunların dışında seramikler, kuru buz, zirkonyum vb. çeşitli yapay aşındırıcılar üretilmektedir.

## 1.6. Literatür Özeti

Su jeti seramik, cam, metal ve kayaç gibi birçok malzemenin kesiminde kullanılabilir. Kesilen malzemenin niteliğine bağlı olarak makine, orman, metalürji ve maden mühendisliğini de içine alan birçok disiplinin üzerinde çalışma yürüttüğü bir yöntemdir. Su jeti ile kayaç kesimini irdeleyen çalışmalar değerlendirildiğinde, ilgili araştırmaların önemli bir kısmının kesme parametreleri ile kesme performansı arasındaki

ilişkileri irdelediği görülmektedir. Bunun yanında, optimum kesme parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da mevcuttur (Summers ve Peters, 1974; Bartolussi vd., 1988; Hagan, 1992; Liu ve Chen, 2002; Huang vd., 2006; Ma ve Deam, 2006; Karakurt, 2007; Aydın vd., 2011; Karakurt vd., 2011; İnal, 2011; Karakurt vd., 2012; Aydın vd., 2013; Karakurt vd., 2014). Kayaçların dokusal ve mineralojik özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkilerini irdeleyen çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır (Miranda ve Quintino, 2005; Karakurt, 2011; İnal, 2011; Aydın vd., 2012). ASJ ile kayaç kesmede, kullanılan aşındırıcının tekrar kullanılabilirliğini inceleyen çalışmalar da literatürde mevcuttur (Babu, 2003; Bishop, 2009; Aydın, 2014; 2015).

Su jeti ile kayaç kesmeyi konu alan çok sayıda çalışma olmasına rağmen, kayaç kesiminde kullanılan/kullanılabilecek garnet dışındaki aşındırıcıların kesme performanslarının irdelenmesine yönelik sınırlı sayıda çalışma olduğu dikkat çekmektedir. (Coşansu ve Coğun, 2012).

### **1.7. Çalışmanın Amacı**

Sahip olduğu çeşitli avantajlar, ASJ'nin doğal taşların kesilmesi ve işlenmesinde kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Su jeti ile kesme uygulamalarında aşındırıcı maliyeti toplam maliyetin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Aşındırıcı olarak genellikle garnet kullanılmasına rağmen; garnete alternatif olarak değerlendirilebilecek (yapay ürünler ve endüstriyel işlemler sonrası açığa çıkan atıklar) birçok malzeme bulunmaktadır. Özellikle, çeşitli uygulamalarda açığa çıkan granit ve cam gibi atık niteliği bulunan malzemelerin bu alanda değerlendirilmesi, ASJ kullanan işletmeler için ekonomik karlılık sağlayabilecektir. Alternatif aşındırıcıların kesme performanslarının belirlenmesi işletme maliyeti ve veriminin tespiti açısından önem arz etmektedir. Yukarıda bahsedilen gerekçeler yanında literatürde de konuyla ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, ASJ ile kayaç kesmede kullanılabilecek çeşitli aşındırıcıların kesme performanslarının belirlenmesi çalışmanın ana amacıdır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1. Materyaller

ASJ ile kayaç kesmede kullanılan deney materyalleri, kesimin yapıldığı doğal taş örnekleri ve kesim esnasında kullanılan farklı aşındırıcılardan oluşmaktadır. Kesim işlemi gerçekleştirilmek üzere olabildiğince homojen bir doğal taş seçilmiş olup bu doğrultuda Mohs sertliği 3-3,5 olan, CaCO<sub>3</sub> kökenli metamorfik mermer tercih edilmiştir. Çalışmalarda Sivrihisar Bej (Crema Eda) adlı mermerden hazırlanan örnekler (20 cm uzunluk, 10 cm genişlik ve 3 cm kalınlık) kullanılmıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Sivrihisar Bej (Crema Eda) mermer yüzey detayı ve plakalar

Mermer kimyasal içerik olarak CaO (% 55,50), MgO (% 2,20), SiO<sub>2</sub> (% 0,24), F<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (% 0,21) ve ateş kaybı (% 41,75) içermektedir. Tablo 2.1’de, mermerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri sunulmaktadır.

Tablo 2.1. Sivrihisar Bej mermerinin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Standart	Özellik	Değer
TS EN 12407	Petrografik tanımlama	Sparitik Kireçtaşı
ASTM-C170	Basma dayanımı	13,12 PSI (90,46 MPa)
TS EN 12372	Eğilme dayanımı	8,4 MPa
TS EN 1936	Görünür yoğunluk	2695 kg/m <sup>3</sup>
TS EN 1936	Açık gözeneklilik	% 0,4
TS EN 13755	Atmosfer basıncı altında su emme	% 0,2 (kütlece)
TS EN 14157	Dikey aşındırma direnci	18,5 mm
TS EN 14231	Kayma direnci	72 SRV (kuru), 79 SRV(ıslak)
TS EN 14066	Termal şok etk. yıpranma direnci	%0,01

ASJ ile doğal taş kesmede, kesme performanslarının karşılaştırılması amacıyla Su Jeti'ne beslemek için 9 farklı aşındırıcı türünün denenmesi planlanmıştır. Kullanılan aşındırıcıların listesi ve bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Deneyleerde kullanılan aşındırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri

Aşındırıcı Adı	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Sertliği (Mohs)
Garnet	4,03	7-7,5
Alüminyum oksit beyaz	3,96	9,03
Alüminyum oksit kahverengi	3,97	9,06
Silisyum karbür	3,21	9,16
Cam küre	2,55	6
Zımpara tozu	4,02	8-8,5
Granit	2,65	~ 6,5
Olivin	3,71	~ 6,5
Fırın cürufu	3,22	~ 7

Çalışma kapsamında kullanılan aşındırıcıların yoğunluk değerleri piknometre yöntemi kullanılarak belirlenmiştir (ASTM D854-14). Deneyleer, K.T.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

Aşındırıcı boyutundaki değişimlerin kesme performansı üzerindeki etkisini sabit tutabilmek adına dar bir boyut aralığında (150-300 µm) aşındırıcılar temin edilmiş ya da hazırlanmıştır. Alüminyum oksit beyaz (Al. ok. beyaz), alüminyum oksit kahverengi (Al. ok. kahve), silisyum karbür (SiC) ve cam küreler istenilen boyut aralığında hazırlatılarak İstanbul'da faaliyet gösteren bir firmadan tedarik edilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan garnet ise (almandin garnet), ASJ ile kesim uygulamasının gerçekleştirildiği, İstanbul'da faaliyet gösteren firmadan temin edilmiştir.

Zımpara tozu, granit, olivin ve fırın cürufu ise çeşitli işlemlerden geçirilerek çalışmalara uygun boyutlara getirilmiştir. Zımpara tozu, İzmir'de faaliyet gösteren bir fabrikadan temin edilmiştir. Çeşitli elekler kullanılarak (150 ve 300 µm'lik elekler) temin edilen malzeme elenmiş ve çalışma gereksinimi için istenilen boyutlarda malzeme elde edilmiştir.

Atık olarak temin edilen granit ve fırın cürufu numuneleri, K.T.Ü. Maden Müh. Bölüm laboratuvarlarında, çalışma gereksinimlerine uygun boyutlara getirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan Baltic Brown ticari isimli granite ait mineralojik analiz Tablo 2.3'te verilmektedir. Granit örnekler önce balyozla 5-6 cm'lik boyutlara parçalanmış ve bu

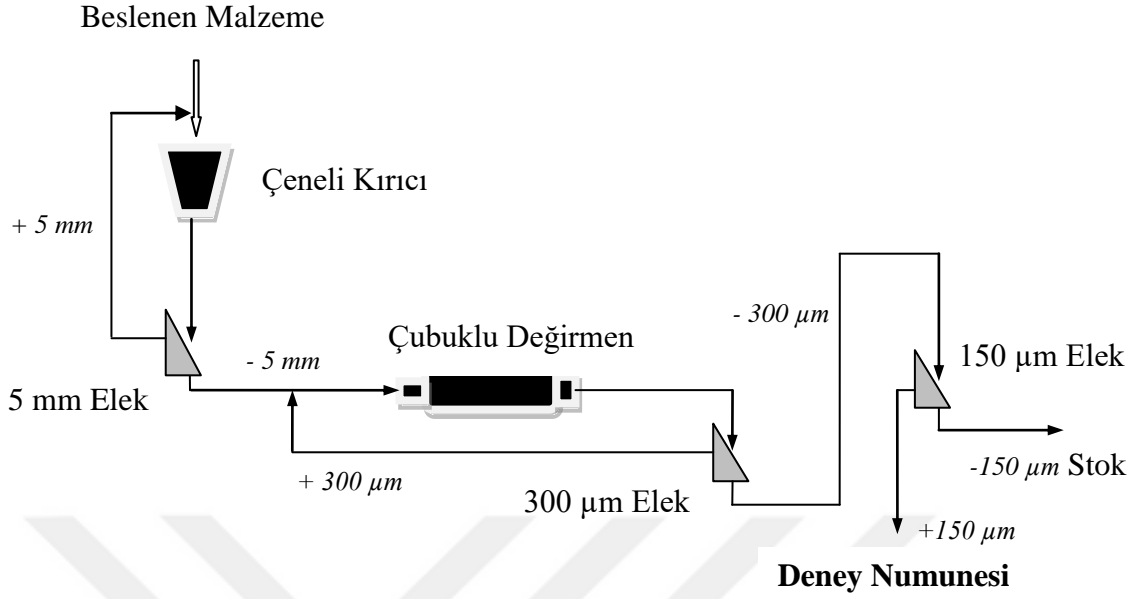
parçalar çeneli kırıcıya beslenerek 5 mm'nin altında malzemeler elde edilmiştir. Çeneli kırıcı ağız açıklığına sığmayan boyuttaki parçalar yeniden kırılarak küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Çeneli kırıcıdan çıkan malzemeler 5 mm'lik elekten geçirilmiş ve elek üstü tekrar kırıcıya beslenmiştir. 5 mm'lik elek altı malzeme ise her seferinde 1 kg olacak şekilde çubuklu değirmene beslenmiştir. Değirmende, farklı çaplarda 15 adet çubuk kullanılarak, 81 devir/dakika hızla öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir. Öğütme sonrası elde edilen malzeme 300 µm'lik elekten geçirilerek elek üstü tekrar değirmene beslenmiştir. 300 µm'lik elekten geçen malzeme ise 150 µm'lik elekten geçirilerek elek altı ayrılmış. Elek üstü malzeme ise kullanılmak üzere paketlenmiştir.

Tablo 2.3. Baltic Brown granitinin mineralojik analizi

İçerik	Oran (%)
Alkali feldspat	57
Kuvars	21
Plajiyoklaz	15
Amfibol	3
Biyotit	3
Diğer	1

Kullanılan cüruf, Kastamonu-Küre bakır cevherinin izabe tesisi flotasyon öncesi atığı olup olivin, Bursa'da faaliyet gösteren bir işletmeden temin edilmiştir. Gerçekleştirilen elek analizlerinde cüruf ve olivin örneklerinin 5 mm'den rahat bir şekilde geçtiği gözlenmiştir. 300 µm'lik elek üstü malzemeler çubuklu değirmene beslenerek granit ile aynı aşamalardan geçirilmiş ve istenilen boyutlarda malzemeler hazırlanmıştır.

Tüm kırma, eleme ve öğütme çalışmaları K.T.Ü. Maden Müh. Bölüm laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Öğütme işlemleri süre kontrollü olarak yapılarak istenilen boyutlardaki malzemelerin elde edilmesine çalışılmıştır. Bilindiği gibi, az öğütlemeyle zaman ve emek kaybı yaşanırken çok öğütmede de malzeme kaybı olmaktadır. Malzemenin cinsine bağlı olarak öğütmenin 30-50 dakika sürede optimum verimi sağladığı gözlenmiştir. Genel olarak kırıp-öğütülen tüm malzemenin yaklaşık %35-50'lik kısmı istenilen boyutta elde edilmiş, gerisi (150 µm'lik eleğin altına geçen) ileride başka çalışmalarda değerlendirilebileceği düşüncesiyle ayrılmıştır. Tüm eleme işlemleri manüel olarak hassas bir şekilde yapılmıştır. Şekil 2.2'de, uygulanan boyut küçültme işlemlerine yönelik bir akım şeması sunulmaktadır.



Şekil 2.2. Aşındırıcı hazırlama boyut küçültme işlemleri

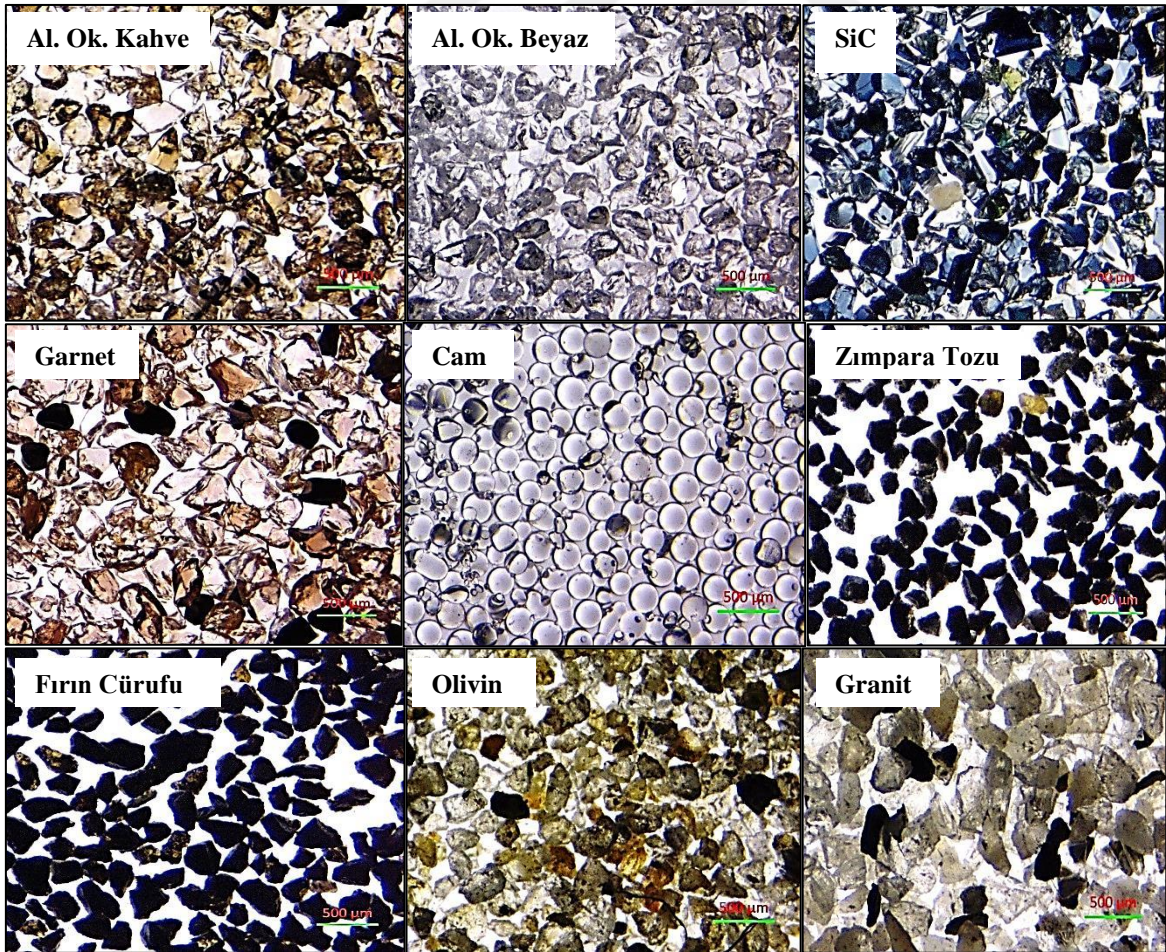
Aşındırıcıların kimyasal analizleri toplu olarak Tablo 2.4'te sunulmaktadır. Bazı aşındırıcılara ait kimyasal analiz değerleri ürünlerin tedarik edildiği firmalardan sağlanmıştır. Diğer aşındırıcıların (fırın cürufu, granit ve olivin) kimyasal analizleri ise Ankara'da faaliyet gösteren bir firmada XRF analizlerinin yapılmasıyla elde edilmiştir.

Aşındırıcıların, ayrıca K.T.Ü. Jeoloji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında mikroskop altında fotoğrafları alınmıştır. 20 kat büyütülerek çekilen fotoğraflar Şekil 2.3'te verilmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde SiC, zımpara tozu ve fırın cürufunun en keskin köşeli tanelere sahip olanlar olduğu görülmektedir. Cam küreler doğal olarak yuvarlak taneli olup, alüminyum oksitler, garnet, olivin ve granit çok keskin olmayan hafif yuvarlak köşelere sahiptir. Ayrıca; garnet, olivin ve granitin farklı serbestleşmiş mineral fraksiyonları içerdiği görülmektedir. Diğerleri ise daha homojen bir görünüm sunmaktadır.



Tablo 2.4. Kullanılan aşındırıcıların kimyasal analizleri

İçerik (%)	A.O. Bey.	A.O. Kah.	SiC	Cam	Garn.	Zım. Tozu	Gran.	Oliv.	Fırın Cür.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,73	95,65	-	2,50	23	62,30	14,30	0,221	3,32
SiO <sub>2</sub>	0,01	0,92	-	71,5	35	8,40	69,20	39,50	38,00
CaO	0,02	0,32	-	8,85	1	1,20	1,88	0,212	0,74
Na <sub>2</sub> O	0,14	-	-	11,15	-	-	3,47	0,020	0,20
MgO	0,01	0,22	-	5,00	7	0,20	0,829	47,20	0,87
K <sub>2</sub> O	-	-	-	1,50	-	-	5,94	0,037	0,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03	0,12	0,24	0,50	33	25,60	3,33	10,00	45,09
MnO	-	-	-	-	1	-	0,055	0,143	0,07
TiO <sub>2</sub>	0,02	2,42	-	-	-	-	0,373	-	-
SiC	-	-	98,00	-	-	-	-	-	-
Diğer	-	-	0,5 C	-	-	-	0,1 BaO	0,71 Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ;	0,8 Cu;
								0,33 NiO	0,4 Co;
									0,97 S



Şekil 2.3. Aşındırıcıların mikroskop altında görünümü

## 2.2. Deney Düzenegi ve Kesim Çalışmaları

Deneyisel çalışmalarda, üç eksenle hareket edebilen bir kesme kafasına sahip ASJ kullanılmıştır. İş planı, bir kontrol odasından bilgisayar yardımıyla yapılmakta olup kesim kontrol paneliyle kontrol edilmektedir. Çalışmalarda kullanılan ve İstanbul'da faaliyet gösteren bir firmaya ait ASJ'nin teknik özellikleri Tablo 2.5'te sunulmaktadır. Deney düzeneginin görünümü ise Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

Tablo 2.5. Deneyisel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılı su jeti makinesine ait özellikler

Makine Tipi	S-HP
Enerji tüketimi (kwh)	40
Aşındırıcı tüketimi (gr/dak)	100-400
Meme çapı (mm)	1,1
Meme uzunluğu (mm)	75
Su tüketimi (lt/dak)	3,8



Şekil 2.4. ASJ makinesi ve deney düzenegi

Mermer örneklerinin uzunlukları boyunca kesim yapılmış ve daha düşük hata paylarının eldesi için her bir deney 3 kez tekrarlanmıştır. Kesim hatlarının birbirleri üzerinde etkileşim oluşturmaması adına, bir örnek üzerinde gerçekleştirilen her bir

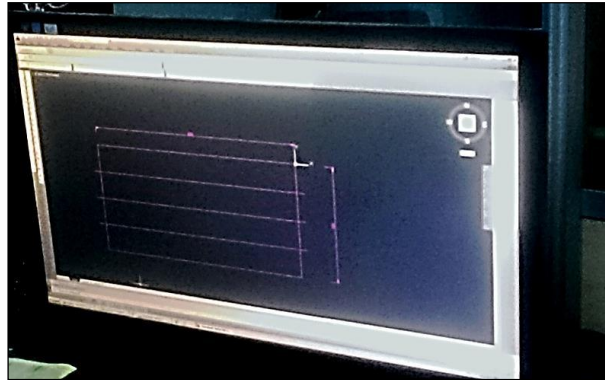
kesim arasında en az 2,5 cm'lik mesafenin bırakılması uygun görülmüştür. Kesimler, mermer örneklerinin bir yönü referans alınarak ilgili yüzey üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın amacı doğrultusunda, farklı aşındırıcıların ASJ ile doğal taş kesme performanslarının irdelenebilmesi adına tüm makine ve kesim parametrelerinin aynı olması hedeflenmiştir. Daha önceden çalışma gereksinimlerine uygun olarak hazırlanan mermer örnekleri üzerinde ön deneyler gerçekleştirilmiş ve kesme parametrelerinin hangi değerlerinde kesimlerin yapılacağı belirlenmiştir (Tablo 2.6).

Tablo 2.6. Kesme parametreleri ve değerleri

<b>Parametre</b>	<b>Değer</b>
Kesme hızı (mm/dak)	100
Aşındırıcı besleme miktarı (gr/dak)	350
Meme-örnek mesafesi (mm)	4
Çalışma (Pompa) basıncı (MPa)	200
Aşındırıcı boyutu ( $\mu\text{m}$ )	150-300

Kesim öncesinde, kesmenin gerçekleştirileceği kesme parametreleri seviyeleri, kullanılacak mermer örneklerinin boyutları ve kesimin nasıl gerçekleştirileceğine yönelik plan bilgisayar programları aracılığıyla sisteme tanıtılmıştır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Bilgisayarda kesim planının programlanması

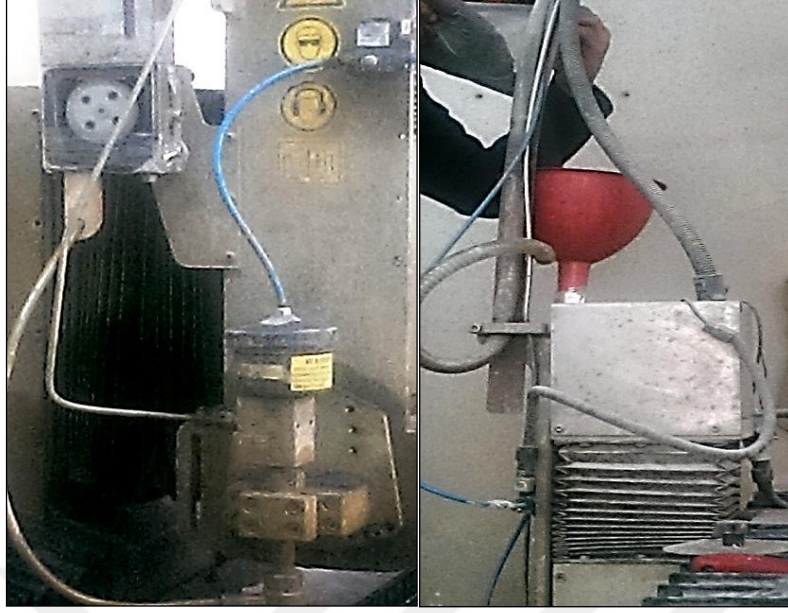
Programlama aşamasından sonra kesilecek ilk mermer örneği, nozulün altına yerleştirilmiş ve sabitlenmesi sağlanmıştır. İlk olarak makinenin aşındırıcı haznesine garnet doldurularak, kontrol panelinden kesme işlemi başlatılmıştır. Sistem bileşenleri, örneğin ilk

kesimini takiben otomatik olarak kendini ayarlayıp ikinci kesim için konum almaktadır. Kesim işlemine ait bir görüntü Şekil 2.6’da sunulmaktadır.



Şekil 2.6. ASJ ile mermer kesim işlemi

Bir mermer örneğinde 3 kesim bittiğinde makine durdurulup örnek alınmış ve bir sonraki kesim için yeni örnek yerleştirilmiştir. Bu aşamada ayrıca, aşındırıcı haznesi boşaltılmış ve performans deneylerinin yapılacağı yeni aşındırıcıyla doldurulmuştur (Şekil 2.7). Bu şekilde toplam 9 mermer örneğinin kesilmesi planlanmıştır. Ancak, olivin ve fırın cürufunun aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerde nozülde çok sık tıkanmaların yaşandığı görülmüştür. Her tıkanmada kesme işlemi durdurulup, nozül ve aşındırıcının karıştırma odasına geldiği hortum temizlenmiş ve kesime devam edilmiştir. Devamında gerçekleştirilen kesimlerde de benzer problemler yaşanmış ve bu iki aşındırıcıyla gerçekleştirilen kesimler başarısız olmuştur. Granit ve zımpara tozuyla gerçekleştirilen kesimlerde nadiren tıkanmalar meydana gelmiş ancak zaman kaybına neden olan ciddi bir durum gözlenmemiştir. Diğer aşındırıcılarla gerçekleştirilen kesimlerde herhangi bir sorunla karşılaşmamıştır. Garnet kullanılarak kesimlerin gerçekleştirildiği çeşitli su jeti uygulamalarında da zaman zaman tıkanmalar yaşanabilmekte ve çok sık olmadığı sürece bu durum normal olarak kabul edilmektedir.



Şekil 2.7. ASJ'nin aşındırıcı haznesi ve aşındırıcının hazneye beslenmesi

Kesim esnasında makinenin kontrolü, kontrol panelinden bir operatör vasıtasıyla sağlanmaktadır. Kesim takip edilerek herhangi bir aksaklık anında makinenin durdurulması ve aksaklık giderildikten sonra yeniden devreye alınması bu panel sayesinde sağlanmaktadır (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. ASJ kontrol paneli

Kesimler tamamlandıktan sonra mermer örnekleri paketlenmiş ve farklı aşındırıcıların kesim performanslarının irdelenmesi adına K.T.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Kesilen bir plaka örneği Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9. Kesilen bir mermer plakanın yüzey görünümü

### 2.3. Kesme Sonrası Kesme Geometrilerinin Analizi

Kesme işleminde başarısız sonuçların elde edildiği 2 aşındırıcı (olivin ve fırın cürufu) haricindeki diğer aşındırıcılarla kesilen mermer örnekleri üzerinde çeşitli ölçümler alınmıştır. Kesme geometrileri olarak adlandırılan; kesme genişliği ( $W$ ), kerf açısı ( $\Theta$ ), kesme derinliği ( $h_t$ ), kesme-aşınma derinliği ( $h_a$ ) ve yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ ) değerlerinin ölçümlerindeki prosedürler aşağıda detaylandırılmıştır.

Kesilen her bir mermer örneği üzerinde, kesme hattı boyunca kumpas yardımıyla 2 cm'lik aralıklarla hassas bir şekilde kesme genişliği ölçülmüştür (Şekil 2.10). Her bir mermer örneği için toplam 27 (9 x 3) ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak kesme genişliği değeri elde edilmiştir.



Şekil 2.10. Kesme genişliğinin ölçümü

Her bir mermer örneğinde gerçekleştirilen kesimler için, kesimin başladığı (giriş) ve bittiği tarafta (çıkış) oluşan üçer yarık için kerf açıları hesaplanmıştır (Şekil 2.11). Elde edilen 3 değer aritmetik ortalaması alınarak giriş ve çıkış bölgeleri kerf açıları hesaplanmıştır.



Şekil 2.11. Kerf açısı hesaplamak için kullanılacak parametrelerin ölçümü

Kerf açılarının hesaplanması için yarığın üst kısmındaki kesme genişliği olan üst yarık genişliği ( $W_{üst}$ ), deformasyon aşınmasının başladığı yerdeki genişlik olan alt yarık genişliği ( $W_{alt}$ ) ve son olarak da yarığın üst noktasından kesme aşınma bölgesinin bitimine kadar olan dik mesafe ( $h$ ) kumpasla hassas olarak ölçülmüştür. İlgili değerler kullanılarak kerf açısı değeri Wang ve Guo (2003) tarafından önerilen (1.1) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Mermer örnekleri üzerinde, elde edilen kesme derinlikleri ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için kesme hattının net bir şekilde görülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla mermer örnekleri kesildikleri hatlar boyunca 4 parçaya ayrılmıştır. Yüzeylerin zarar görmesini önleyecek şekilde her kesime mukavva parçalar yerleştirilmiş ve hafif bir darbeye önemli bir bölümü kesilmiş olan örneklerin çoğunun rahatça ayrılması sağlanmıştır. Bu yöntemle ayrılması mümkün olmayan örneklerin (düşük kesme derinliği olanlar) Trabzon'da faaliyet gösteren bir mermer fabrikasında bu amaçla kesimi yapılmıştır. Gerçekleştirilen kesimlerde, mermer örnekleri ters çevrilerek dairesel testere ile kesiklerle aynı hizada kesim yapılmıştır. Kesim hatlarının çakışmamasına özen gösterilmiş ve elde edilen kesme derinliklerine bağlı olarak her iki kesim arasında emniyetli bir mesafe bırakılmıştır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Mermer plakaların dairesel testere ile kesimi

Kesim ekseni boyunca ayrılmış bir mermer örneği Şekil 2.13'de görülmektedir. Ayrılmış her bir parça sıra ve yönleri karıştırılmadan numaralandırılarak ölçümler için hazırlanmıştır. Yüzeyden kesimin en alt noktasına kadar olan dikey mesafeyi ifade eden kesme derinliği, kesme hattı boyunca 2 cm'lik aralıklarla kumpas kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Her bir mermer örneği için toplam 27 ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak kesme derinliği elde edilmiştir (Şekil 2.14).



Şekil 2.13. Kesim hattı boyunca dilimlere ayrılmış mermer plaka



Şekil 2.14. Kesme derinliğinin ölçümü



Kesim sonrası ölçülen bir diğere parametre de kesme-aşınma bölgesi derinliğidir. Kesme derinliği ile aynı hat üzerinde, kesme-aşınması ile deformasyon-aşınma bölgesi sınırına kadar olan derinlik olarak tanımlanan bu parametrenin ölçümünde kesme derinliği ölçümüne benzer bir prosedür izlenmiştir.

Kesim yüzeylerinde pürüzlülük ölçümü için bir pürüzlülük ölçer cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.15). Tüm örneklerde, kesme-aşınma bölgesinde belirli bir yatay hat belirlenmiş ve 2 cm'lik aralıklarla bu hat boyunca pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.



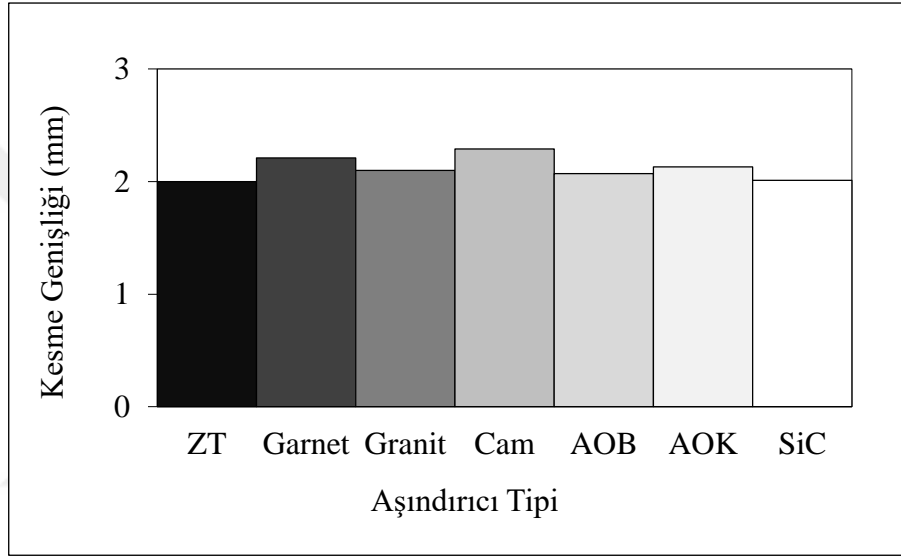
Şekil 2.15. Pürüzlülük ölçüm cihazı ve kesim yüzeylerinde pürüzlülük değerlerinin ölçümü

Her kesikten, tek kesim yüzeyinden 9 ve her bir mermer örneğinden 27 ölçüm alınarak  $R_a$  (Aritmetik Ortalama Pürüzlülük),  $R_q$  (Kuadratik Ortalama Pürüzlülük) ve  $R_z$  (Maksimum Pürüzlülük Derinliği) değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak her örnek için ilgili pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR

#### 3.1. Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kesme Genişliğinin Değişimi

Farklı aşındırıcılar kullanılarak kesilmiş her bir mermer örneğinden elde edilen kesme genişliği değerleri Şekil 3.1’de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Kesme genişliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi

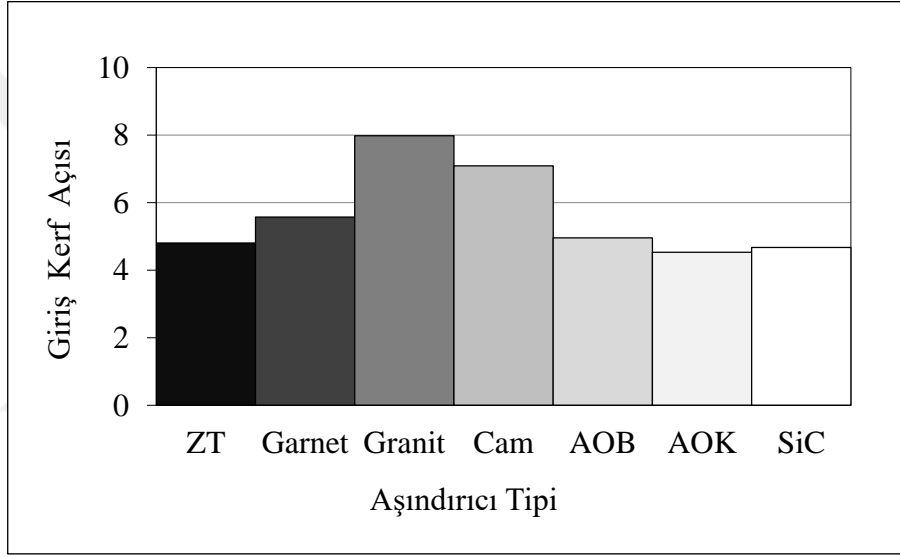
Kesme genişliği arttıkça, kesilen malzemeden uzaklaştırılan malzeme miktarı artacağı için, kesme genişliği değerinin düşüklüğünün, daha iyi bir kesme performansını belirttiği söylenebilir. Şekil 3.1’den görüldüğü gibi en düşük kesme genişliği değerleri 2,00 mm ile zımpara tozu (ZT) ve 2,01 mm ile silisyum karbürün (SiC) aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerden elde edilmiştir. Bunları sırasıyla 2,07 mm kesme genişliği ile alüminyum oksit beyaz (AOB), 2,10 mm kesme genişliği ile granit ve 2,13 mm kesme genişliği ile alüminyum oksit kahverengi (AOK) takip etmiştir. Garnet, 2,21 mm kesme genişliği değeri vermiş olup en geniş kesme genişliği değeri 2,29 mm ile cam ile elde edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar kesme genişliği temelinde değerlendirildiğinde, cam haricindeki diğer bütün aşındırıcıların garnetten daha iyi bir kesme performansı sunduğu görülmektedir. Garnete göre zımpara tozu %10, silisyum karbür %9, alüminyum oksit

beyaz %6, granit %5, alüminyum oksit kahverengi ise %4 daha düşük kesme genişliği değerleri vermiştir. Cam ile gerçekleştirilen kesimlerde ise garnete göre %4 daha yüksek kesme genişliği değerleri elde edilmiştir.

### 3.2. Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kerf Açılarının Değişimi

Aşındırıcı türüne bağlı olarak elde edilen giriş ve çıkış kerf açıları sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te sunulmaktadır.

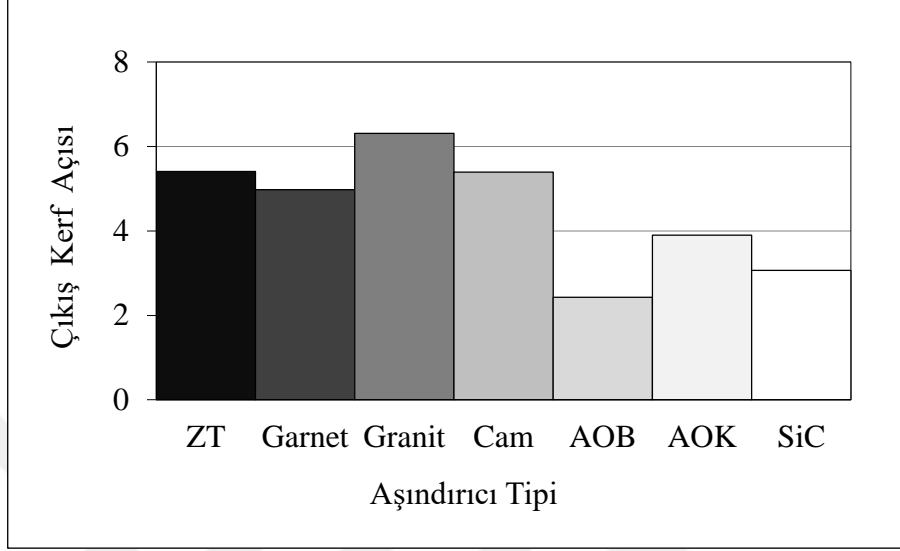


Şekil 3.2. Giriş kerf açısının aşındırıcılara bağlı değişimi

Kerf açısı, kesim kanalındaki eğimi ifade eder. Kesim yüzeyinden kesme kanalının derinliğine doğru, eğim arttıkça (kerf açısı arttıkça) kesme performansının düştüğü söylenebilir. Zira eğimli bir kesimde kesilen yüzeylerin düzeltilmesi için ikincil bir işleme gerek duyulacaktır. Dolayısıyla kerf açısının düşük olması daha iyi bir kesim yapıldığı anlamı taşımaktadır. Şekil 3.2'den görüldüğü gibi, kesimin giriş noktalarında en düşük kerf açıları  $4,53^{\circ}$  ile alüminyum oksit kahverengi ve  $4,68^{\circ}$  ile silisyum karbürden elde edilmiştir. Bunları sırasıyla  $4,81^{\circ}$  ile zımpara tozu ve  $4,96^{\circ}$  ile alüminyum oksit beyaz takip etmiştir. Garnet,  $5,58^{\circ}$  ile beşinci sırada yer alırken, en yüksek açılar ise  $7,09^{\circ}$  ile cam ve  $7,98^{\circ}$  ile granitten elde edilmiştir.

Sonuçlar giriş kerf açıları temelinde kıyaslandığında, garnete oranla alüminyum oksit kahverengi %19, silisyum karbür %16, zımpara tozu %14 ve alüminyum oksit beyaz %11

daha düşük değerler vermiştir. Cam ve granit ile gerçekleştirilen kesimlerde ise garnete göre sırasıyla %27 ve %43 daha yüksek giriş kerf açısı değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Çıkış kerf açısının aşındırıcılara bağlı değişimi

Kesimin çıkış noktalarındaki kerf açıları incelendiğinde ise (Şekil 3.3) alüminyum oksit beyazın 2,43° ile en düşük değeri verdiği görülmektedir. Bunu sırasıyla 3,07° ve 3,90° değerleriyle silisyum karbür ve alüminyum oksit kahverengi takip etmektedir. Garnet, 4,98° ile dördüncü sırada yer alırken, 5,39° ile cam beşinci sıradadır. En yüksek açı değerleri ise sırasıyla 5,41° ile zımpara tozu ve 6,3° ile granitten elde edilmiştir.

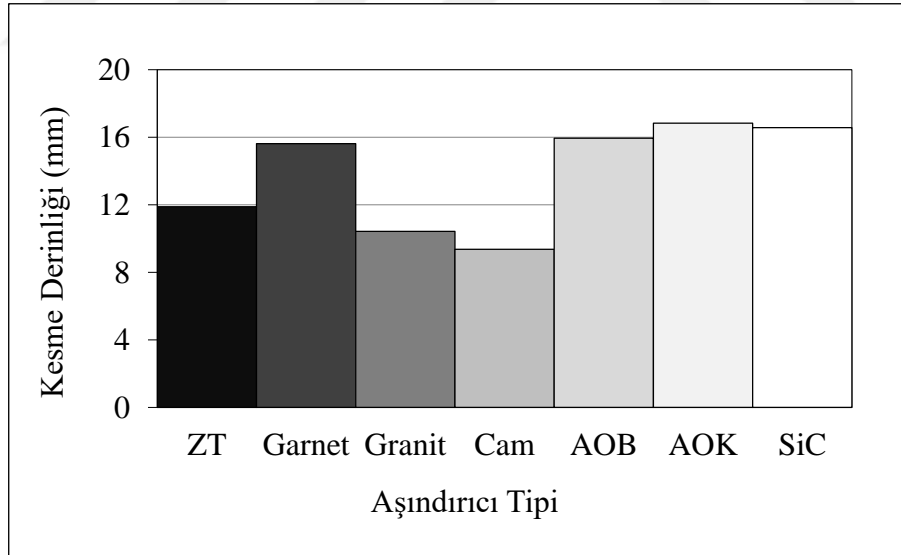
Çıkış kerf açıları garnetle kıyaslandığında ise alüminyum oksit beyazın %51, silisyum karbürün %38 ve alüminyum oksit kahverenginin %22 daha düşük değerler verdiği görülmüştür. Garnetten daha yüksek değerler veren aşındırıcılar ise sırasıyla %8'lik değerle cam, %9 ile zımpara tozu ve %27 ile granit olmuştur.

Giriş ve çıkış kerf açıları birlikte değerlendirildiğinde zımpara tozu haricindeki bütün aşındırıcılarda çıkış açılarının giriş açılarından daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Zımpara tozu kullanılan kesimlerde ise çıkış açısı giriş açısından daha büyük değer vermiştir.

### 3.3. Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Kesme Derinliklerinin Değişimi

Gerçekleştirilen kesimlerde elde edilen kesme derinliği değerlerinin aşındırıcı tipine bağlı olarak değişimi Şekil 3.4'te sunulmaktadır. Kesme derinliği, ASJ ile kesme performansını belirten en önemli parametrelerden birisidir. Sabit kesme koşullarında kesme derinliğinin artması daha iyi kesme performansı anlamına gelmektedir. Şekil 3.4'ten görülebileceği gibi en iyi kesme derinliği değerleri, 16,84 mm ile alüminyum oksit kahverengi ve 16,58 mm ile silisyum karbürden elde edilmiştir. Bunları, 15,95 mm ile alüminyum oksit beyaz ve 15,62 mm ile garnet takip etmektedir. Zımpara tozu, 11,90 mm kesme derinliği değeri vermiş olup en düşük değerler 10,43 mm ile granit ve 9,37 mm ile camın aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerden elde edilmiştir.

Garnetle kıyaslandığında ise kesme derinliği; alüminyum oksit kahverengide %8, silisyum karbürde %6 ve alüminyum oksit beyazda %2 daha yüksek elde edilmiştir. Zımpara tozunda garnete göre %24 daha düşük kesme derinliği elde edilirken, en düşük değerler %33'le granit ve %40'la cam için elde edilmiştir.

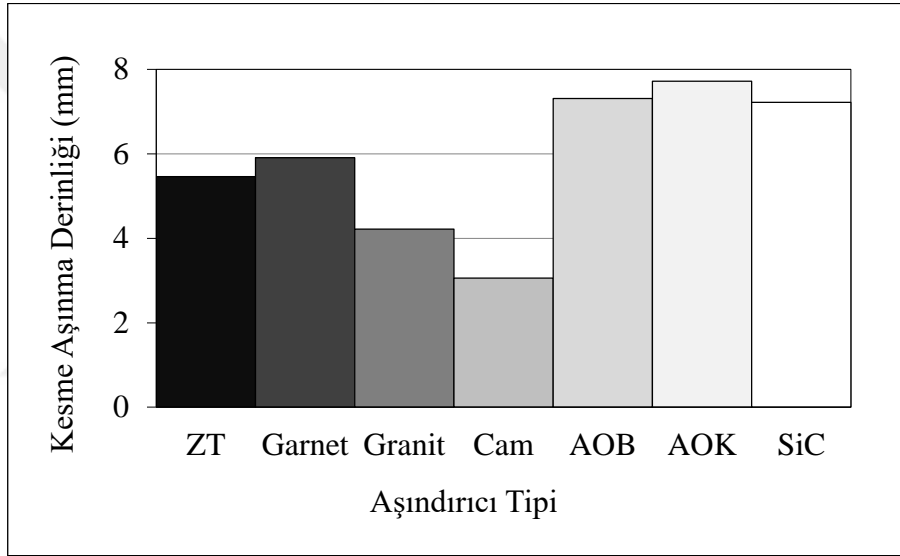


Şekil 3.4. Kesme derinliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi

Kesme-aşınma bölgesi derinliğinin aşındırıcı tipine bağlı değişimi ise Şekil 3.5'te verilmiştir. Kesme derinliğinde olduğu gibi, bu parametrenin de büyük değerleri daha iyi bir kesme performansına işaret eder. Bu değerlerin altında kalan kesim yüzeyleri deformasyon aşınması dolayısıyla çizikli/dalgalı görünümde olup düzeltilmesi için ikincil

bir işleme ihtiyaç duyarlar. Şekil 3.5'ten de anlaşıldığı gibi kesme-aşınma bölgesi derinliği temelinde aşındırıcıların performans sırası, beklenildiği üzere kesme derinliği benzerinde bir eğilim sunmaktadır. Kesme derinliği değeri yüksek olanın, kesme-aşınma derinliğinin de doğru orantılı olarak artması olağandır.

Şekil 3.5'e bakıldığında en iyi kesme-aşınma bölgesi derinliği değerlerinin, 7,72 mm ile alüminyum oksit kahverengi ve 7,31 mm ile alüminyum oksit beyazdan elde edildiği görülmektedir. Bunları, 7,22 mm ile silisyum karbür takip etmektedir. Garnet ve zımpara tozu sırasıyla 5,91 mm ve 5,46 mm kesme-aşınma derinliği değerleri vermiş olup en düşük değerler 4,22 mm ile granit ve 3,06 mm ile camın kullanıldığı kesimlerden elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Kesme-aşınma derinliğinin aşındırıcılara bağlı değişimi

Garnetle kıyaslandığında ise kesme-aşınma derinliği değerleri alüminyum oksit kahverengide %31, alüminyum oksit beyazda %24 ve silisyum karbürde %22 oranında daha fazla; zımpara tozunda %8, granitte %19 ve camda ise %48 oranında daha düşük olarak elde edilmiştir.

Kesme aşınma-derinliği ve kesme derinlikleri kendi içinde düşünüldüğünde ise, kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği ( $h_a/h_t$ ) oranını da değerlendirmek gerekir. Bu oran 1'e yaklaştıkça, deformasyon aşınması bölgesi olarak kesim iç yüzeyi boyunca oluşan alan azalacağı için, kesme performansına olumlu yansıtacağı söylenebilir. Tablo 3.1'de, aşındırıcılara göre yapılan kesimlerden elde edilen kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği değerleri verilmiştir. Tablo 3.1 ve önceki veriler incelendiğinde alüminyum oksit

kahverengi, alüminyum oksit beyaz ve silisyum karbürün garnete göre hem daha yüksek derinlik değerleri sunduğu hem de kendi içlerinde daha yüksek  $h_a/h$  oranları verdiği görülmektedir. Zımpara tozu ve granit ise kesme derinlik değerleri olarak garnetten daha düşük olmalarına rağmen  $h_a/h$  değerleri bazında daha yüksek değerler vermişlerdir. Cam ise hem kesme derinlikleri hem de  $h_a/h$  oranı bazında garnetten daha düşük sonuçlar vermiştir.

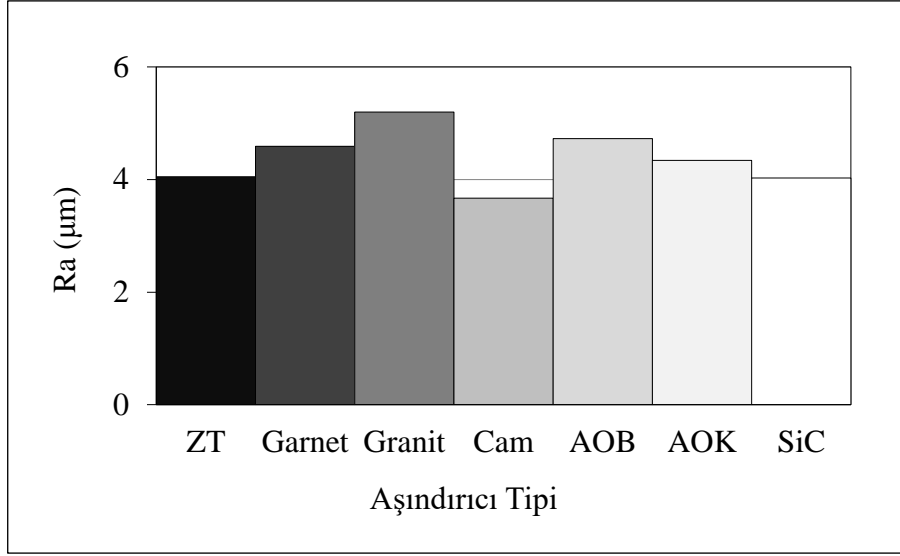
Tablo 3.1. Kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği ( $h_a/h_t$ ) oranının aşındırıcılara bağlı değişimi

Aşındırıcı Tipi	$h_a/h$
Alüminyum oksit kahverengi	0,46
Alüminyum oksit beyaz	0,46
Zımpara tozu	0,46
SiC	0,44
Granit	0,40
Garnet	0,38
Cam	0,33

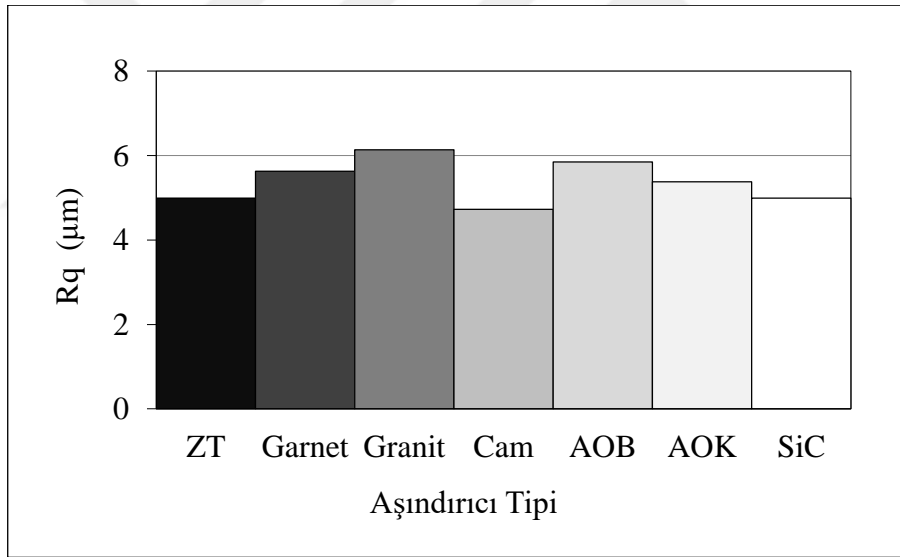
#### 3.4. Aşındırıcı Çeşidine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi

Aşındırıcılara bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülüğü değerleri,  $R_a$ ,  $R_q$  ve  $R_z$ 'nin değişimi sırasıyla Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de sunulmaktadır. Pürüzlülük parametrelerinin düşük değerleri, kesme yüzeyinin daha az pürüzlü, bir başka deyişle daha düzgün olduğunu belirtmesinden ötürü daha iyi bir kesme performansına işaret etmektedir. Şekil 3.6'dan görülebileceği gibi en iyi aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerini 3,67  $\mu\text{m}$  ile cam vermiştir. Cam'ı, 4,03  $\mu\text{m}$  ve 4,05  $\mu\text{m}$  değerleriyle sırasıyla silisyum karbür ve zımpara tozu takip etmiştir. Alüminyum oksit kahverengi 4,34  $\mu\text{m}$  değerle bunları takip etmiş, garnet ise 4,59  $\mu\text{m}$   $R_a$  değeri vermiştir. Alüminyum oksit beyaz, 4,73  $\mu\text{m}$  ile garneti takip ederken en yüksek değeri 5,20  $\mu\text{m}$  ile granit vermiştir.

Şekil 3.7 incelendiğinde ise kuadratik ortalama pürüzlülük ( $R_q$ ) değerlerinin de doğal olarak  $R_a$  değerleriyle paralellik taşıdığı görülmektedir. Cam, 4,73  $\mu\text{m}$  ile en iyi (en düşük) değeri verirken, camı 4,99  $\mu\text{m}$  değerleriyle silisyum karbür ve zımpara tozu takip etmiştir. Alüminyum oksit kahverengi 5,38  $\mu\text{m}$ , Garnet 5,63  $\mu\text{m}$  değerler vermiş olup en yüksek değerler sırasıyla 5,85  $\mu\text{m}$  ile alüminyum oksit beyaz ve 6,14  $\mu\text{m}$  ile granitten elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi



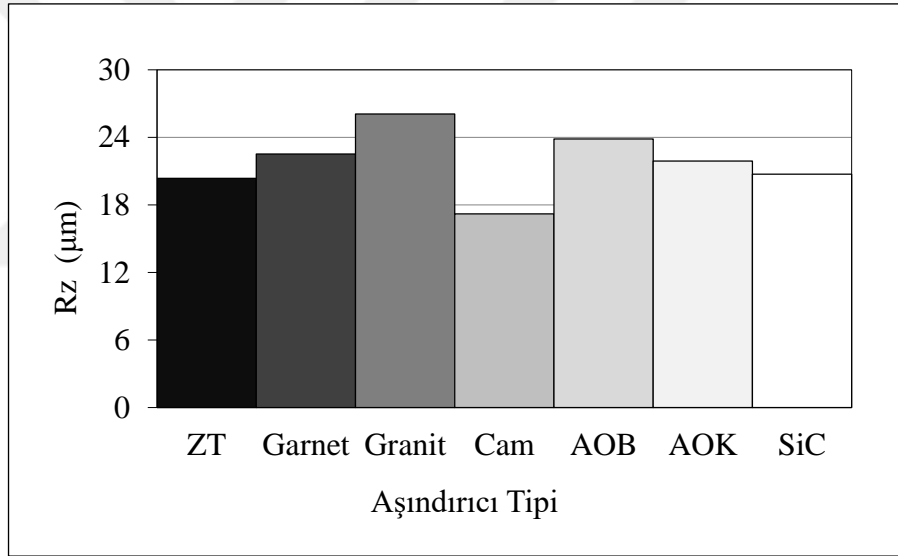
Şekil 3.7. Kuadratik ortalama pürüzlülük ( $R_q$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi

Şekil 3.8 incelendiğinde ise maksimum pürüzlülük derinliği ( $R_z$ ) değerinin de yine beklenildiği gibi, aşındırıcı tipine bağlı olarak değişiminin diğer pürüzlülük değerleriyle paralel bir durum sergilediği görülmektedir. Burada yine en düşük değeri, 17,20  $\mu\text{m}$  ile cam verirken, zımpara tozu 20,37  $\mu\text{m}$  ve silisyum karbür 20,74  $\mu\text{m}$  ile camı takip etmişlerdir. Alüminyum oksit kahverengi 21,90  $\mu\text{m}$  değer vermiş olup garnette ise bu değer 22,52  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Yine, en yüksek (en olumsuz) değerler alüminyum



oksit beyaz ve granitten elde edilmiş olup bu değerler sırasıyla 23,87  $\mu\text{m}$  ve 26,08  $\mu\text{m}$  olarak kaydedilmiştir.

Garnetle kıyaslandığında yüzey pürüzlülüklerinde  $R_a$  için; cam %20, silisyum karbür ve zımpara tozu %12 ve alüminyum oksit kahverengi %5 oranında daha düşük değerler vermiş olup, alüminyum oksit beyaz %3, granit ise %13 oranında daha yüksek değerler vermiştir.  $R_q$  için ise, benzer şekilde; cam %16, silisyum karbür ve zımpara tozu %11 ve alüminyum oksit kahverengi %4 oranında daha düşük değerler vermiş olup, alüminyum oksit beyaz %4, granit ise %9 oranında daha yüksek değerler vermiştir. Son olarak,  $R_z$  değeri için ise, yine benzer şekilde; cam %24, zımpara tozu %10, silisyum karbür %8 ve alüminyum oksit kahverengi %3 oranında daha düşük değerler vermiş olup, alüminyum oksit beyaz %6, granit ise %16 oranında daha yüksek değerler vermiştir.



Şekil 3.8. Maksimum pürüzlülük derinliği ( $R_z$ ) değerinin aşındırıcılara bağlı değişimi

### 3.5. İrdeme

ASJ ile doğal taş kesiminde aşındırıcı olarak 9 farklı ürünün kullanıldığı bu çalışmada olivin ve fırın cürufunun nozülde tıkanmalara yol açtığı gözlenmiştir. Bu nedenle, ilgili aşındırıcılar ile elde edilen veriler kesme performansı açısından değerlendirilmemiştir. Tıkanmalar sonucunda makine durdurulmakta ve makinenin çeşitli bileşenleri (aşındırıcının içerisinde yol aldığı hortum ve nozül) temizlenmektedir. Bu

işlemler zaman kaybına yol açmakta ve etkili bir kesme işleminin gerçekleştirilmesini imkansız kılmaktadır. Mevcut tıkanmalara aşağıda bahsedilen iki durumun neden olabileceği düşünülmektedir.

- i. Söz konusu aşındırıcı tanelerinin suyla teması ile oluşan akışkan ortamda, aşındırıcı taneleri birbirlerine yapışma/tutunma özelliği gösterebilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak daha büyük boyutlu tane kümeleri meydana gelebilmekte ve bu kümelenme nozülde tıkanmalara yol açabilmektedir.
- ii. Bir diğer olasılık da suda çözünen/dağılan fraksiyonların akışkan ortamın viskozitesini artırıp çamur kıvamında bir ağır ortam oluşturması ihtimalidir. Özellikle olivinin bünyesinde bulunabilecek serpantin, suyla etkileşimi halinde hacmi artmaktadır. Bu çalışmada kullanılan olivinin elde edildiği Bursa Orhaneli civarındaki olivinlerin yoğun serpantinleşmeye maruz kaldığı, Yüksel (2011) tarafından yapılan araştırmada tespit etmiştir.

7 farklı aşındırıcı kullanılarak yapılan kesim sonuçları, farklı performans kriterleri referans alınarak değerlendirilmiştir. Tablo 3.2’de her bir aşındırıcının ilgili performans göstergesi açısından başarı sırası sunulmaktadır.

Tablo 3.2. Aşındırıcıların kesme performans sıralaması

<b>Performans Kriteri</b>	<b>Al.Ok. Kahve</b>	<b>Al.Ok. Beyaz</b>	<b>SiC</b>	<b>Zımp.</b>	<b>Garn.</b>	<b>Cam</b>	<b>Granit</b>
Kesme derinliği	1	3	2	5	4	7	6
Kesme genişliği	5	3	2	1	6	7	4
Giriş kerf açısı	1	4	2	3	5	6	7
Çıkış kerf açısı	3	1	2	6	4	5	7
Ortalama pürüzlülük	4	6	2	3	5	1	7

1: En iyi

7: En kötü

Kullanılan çeşitli aşındırıcıların, garnet ile daha net bir şekilde kıyaslanabilmesi adına, garnetin farklı performans göstergeleri açısından kesme performansı 1 olarak kabul edilmiş ve diğer aşındırıcıların performansı bu temelde irdelenmiştir (Tablo 3.3)

Tablo 3.3. Aşındırıcıların garnete göre performansları

Performans Kriteri	Al.Ok. Kahve	Al.Ok. Beyaz	SiC	Zımp.	Garn.	Cam	Granit
Kesme derinliği	1,08	1,02	1,06	0,76	1	0,60	0,67
Kesme genişliği	1,04	1,06	1,09	1,10	1	0,96	1,05
Giriş kerf açısı	1,19	1,11	1,16	1,14	1	0,73	0,57
Çıkış kerf açısı	1,22	1,51	1,38	0,91	1	0,92	0,73
Ortalama pür. (Ra)	1,05	0,97	1,12	1,12	1	1,20	0,87

Tablo 3.2 ve Tablo 3.3 incelendiğinde, en iyi kesme derinliği ve giriş kerf açısının alüminyum oksit kahverengi ile gerçekleştirilen kesimlerde elde edildiği görülmektedir. Bunun yanında, en iyi çıkış kerf açısı alüminyum oksit beyazla elde edilirken en düşük kesme genişliği zımpara tozunda elde edilmiştir. Ayrıca, camın yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu verdiği de belirlenmiştir. Buna karşın en kötü kesme derinliği ve genişliği cam ile elde edilirken en kötü kerf açıları ve yüzey pürüzlülüğü granit ile elde edilmiştir. Kesme derinliği ele alındığında genel anlamda sertliği ve yoğunluğu yüksek aşındırıcıların daha iyi performans gösterdiği söylenebilmektedir. Ancak, zımpara tozu garnetten daha sert bir malzeme olmasına rağmen daha kötü performans sergilemiştir. SiC ise yoğunluk sıralamasında beşinci sırada yer almasına rağmen, en iyi ikinci kesme derinliğine sahiptir. Farklı aşındırıcılar için elde edilen kesme genişliği değerleri birbirine oldukça yakın ve kabul edilebilir sınırlar içerisinde değişmektedir. Kesme genişlikleri irdelendiğinde ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk farklılıklarının ilgili performans göstergesi üzerinde tanımlanabilir bir trende imkan sağlamadığı görülmektedir. Kerf açılarında da net bir trend olmamasına rağmen, genel eğilim olarak sert ve yoğunluğu yüksek aşındırıcılarda daha düşük kerf açılarının elde edildiği söylenebilir. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde de sertlik ve yoğunlukla değişen belirgin bir eğilim yakalamak mümkün olmamıştır. Ancak, en iyi yüzeylerin cam ve SiC tarafından elde edildiği sonucu aşındırıcı kırılgenliğinin yüzey pürüzlülüğünü azaltması şeklinde yorumlanabilir. Bu iki aşındırıcıyla gerçekleştirilen kesmelerde, çalışma sonrası mermer örneklerinin kesim yüzeylerinde aşındırıcı tanelerinin dağılıp ufalanarak biriktiği gözlemlenmiştir.

Sayısal olarak kesme performans verilerini ortaya koyan bilimsel verilerle birlikte değerlendirilmesi gereken önemli bir konu da aşındırıcıların maliyetidir. Zira ASJ ile kesme işlemlerinde işletme maliyetinin büyük bir kısmını aşındırıcı maliyeti oluşturmaktadır. Kullanılan aşındırıcıların Türkiye’de çeşitli firmalardan alınan ortalama fiyatları Tablo 3.4.’te verilmektedir.

Tablo 3.4. Kullanılan aşındırıcıların birim fiyatları (2016)

Aşındırıcı Türü	Fiyat (₺/kg)
Garnet	1,60
Al. ok. kahve.	3,04
Al. ok. beyaz	5,20
SiC	5,20
Zımpara tozu	4,40
Cam	3,04
Granit	-

Tablo 3.4'ten görüldüğü gibi garnetin su jeti uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden birisi düşük fiyatıdır. Ancak, çalışmalar için gerekli olan uygun aşındırıcı seçiminde sadece fiyat temelinde değerlendirmelerin yapılması uygun olmayacaktır. Aşındırıcı seçiminde, su jeti uygulamalarında kesim maliyeti ve nihai ürünün kazancı gibi birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Bunun yanında, kesilecek malzemenin cinsi, kalınlığı ve kesim sonrasında istenilen yüzey özellikleri de aşındırıcı seçiminde göz önüne alınması gereken önemli kriterler arasındadır. İhtiyaç duyulan gereksinimler doğrultusunda daha düşük kesme performansına sahip aşındırıcıların kesmede kullanılabilmesi mümkün olabilecektir.

Granit gibi doğada doğal ve çeşitli işlemler sonucunda atık haline dönüşen malzemelerin aşındırıcı olarak kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Aşındırıcı olarak bu malzemelerin kullanımı için başlıca boyut küçültme/sınıflandırma işlemlerinin yapılması yeterli olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, bu aşındırıcıların piyasada hazır satılan aşındırıcılardan daha ekonomik olacağı açıktır.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan aşındırıcılar, elde edilen kesme derinlikleri haricinde kesme performans parametreleri yönünden birbirlerine yakın değerler sunmuşlardır. Alüminyum oksitler ve silisyum karbür; garnetten iyi kesme performansı göstermiş; zımpara tozu ise garnetle benzer bir performansı göstermiştir. Bu aşındırıcıların hepsi ASJ ile mermer kesiminde verimli olarak kullanılabilir. Granit, düşük kesme performansı göstermesine rağmen çevresel atık olarak değerlendirildiğinde ASJ'de kullanılabilme potansiyeli göz ardı edilmemelidir. Cam ise benzer şekilde düşük performans göstermesine rağmen bir atık olarak açığa çıktığı uygulamalarda gerekli işlemlerden geçirilerek bertarafı amacıyla kullanılabilir. Ayrıca, cam yüzey pürüzlülüğü açısından iyi performans gösterdiğinden hassas yüzeylere ihtiyaç duyulan kesim uygulamalarında tercih edilebilir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada aşındırıcılı su jeti ile çeşitli aşındırıcılar (alüminyum oksit kahverengi, alüminyum oksit beyaz, silisyum karbür, zımpara tozu, garnet, cam, granit, olivin ve bakır fırın cürufu) kullanılarak mermer kesimleri yapılmıştır. Aşındırıcılar temelinde kesme performansının değerlendirilebilmesi adına, kesme parametrelerine (kesme hızı, meme-örnek mesafesi, aşındırıcı besleme miktarı ve jet basıncı) ait çalışma değerleri sabit tutulmuş ve aşındırıcı tipinin performans üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Aşındırıcıların performans değerlendirmelerinde, kesme derinliği, kesme genişliği, kerf açıları ve yüzey pürüzlülük değerleri referans alınmıştır. Aşındırıcıların doğal olanları çeşitli işlemlerden geçirilerek çalışma gereksinimlerine uygun boyutlara getirilmiştir. Yapay aşındırıcılar ise istenilen boyutlarda piyasadan temin edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir.

- i. Olivin ve fırın cürufuyla yürütülen çalışmalarda nozül sık sık tıkanıdığı için bu aşındırıcılarla gerçekleştirilen kesimler başarısız sonuçlar vermiştir.
- ii. En iyi kesme derinliği ve giriş kerf açısı alüminyum oksit kahverengi kullanılarak elde edilirken en iyi çıkış kerf açısının alüminyum oksit beyaz ile elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, en iyi kesme genişliği zımpara tozu ile elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu veren aşındırıcının cam olduğu belirlenmiştir. Buna karşın en kötü kesme derinliği ve genişliğinin cam ile en kötü kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğünün ise granit ile elde edildiği de çalışmanın diğer bir sonucudur.
- iii. Kullanılan aşındırıcıların kesme performanslarının kesme derinlikleri açısından büyük farklılıklar gösterdiği gözlenmiştir. Silisyum karbür ve alüminyum oksitlerin genel itibariyle garnetten yüksek performanslar sergilediği belirlenmiştir. Zımpara tozunun garnet ile benzer bir performans sergilediği, cam ile granitin ise genelde garnetten daha kötü performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.
- iv. Diğer performans kriterleri açısından kötü bir performans göstermesine rağmen camın yüzey pürüzlülüğü temelinde en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Daha hassas kesme yüzeylerinin elde edilmek istendiği kesimler için alternatif bir aşındırıcı olarak önerilebilir. Bunun yanında, cam ve granit çeşitli uygulamalarda

atık olarak açığa çıkabilmektedir. Bu tip malzemelerin aşındırıcı olarak kullanılabilmesi çevresel açıdan olumlu sonuçlar doğuracaktır. Camın ve granitin ASJ ile mermer kesiminde alternatif bir aşındırıcı olarak etkin bir biçimde kullanılabilirliğinin tespiti çalışmanın önemli bir sonucudur.

- v. Çalışma sonuçları, çalışma kapsamında değerlendirilen aşındırıcıların (olivin ve fırın cürufu harici) mermer kesmede etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Kesim maliyeti, kesilecek malzemenin cinsi, kalınlığı ve kesim sonrasında istenilen yüzey özelliklerine bağlı olarak çalışma kapsamında önerilen çeşitli aşındırıcıların kullanılabilmesi mümkün olacaktır.

Konu ile ilgili çalışmaları detaylandırmak, literatüre ve sektörde yürütülen faaliyetlere katkı sağlamak amacıyla aşağıdaki çalışma alanlarının da dikkate alınması, konuyu ileri seviyelere taşıyacaktır.

- i. Nozülde tıkanma yapan doğal aşındırıcılarda buna neden olan olay ve fraksiyonlar araştırılıp gerekirse temizlendikten sonra saflığı arttırılmış aşındırıcının tekrar kullanımı denenmelidir. Örneğin, bakır fırın cüruflarında esas sert kısmı oluşturan demir silikat fazı manyetik ayırmayla ayrılabilir. Ayrıca, su jetinde kullanım anında aşındırıcı besleme odasına dispersant denilen dağıtıcı ürünler (sodyum silikat, sodyum sülfür gibi) eklenip, tıkanmaya neden olan durumun ortadan kalkıp kalkmayacağı denetlenebilir.
- ii. Bu çalışmada bağımsız parametreler (kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, pompa basıncı, meme-örnek mesafesi) ve kullanılan numune sabit tutulmuştur. Kesme parametrelerinin farklı seviyelerinde aşındırıcı performanslarının irdelenmesi ve kesme örneği olarak farklı kökenli kayaların kullanılması daha kapsamlı verilerin elde edilmesine olanak sağlar.
- iii. Su jeti yönteminde aşındırıcı olarak kullanılabilme potansiyeli bulunan farklı aşındırıcıların da (deniz kumu, bazalt, bor karbür, zirkonyum silikat vb.) benzer amaçlarda kullanımı büyük önem arz etmektedir. Farklı aşındırıcıların kesme performanslarının irdelenmesiyle bu çalışmada önerilen aşındırıcılara alternatif oluşturabilecek aşındırıcılar belirlenebilir.

## 5. KAYNAKLAR

- Arıkan, M, 1968. Mermer ve Mermercilik, Ankara Basım ve Ciltevi, 187 s.
- ASTM, 2014. Standart Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, D854-14, ASTM International, West Conschohocken, PA.
- Aydın, G., 2012. Kesici Disklerin Kayaç Kesme Performansının Araştırılması ve Performans Tahminine Yönelik Modellerin Geliştirilmesi Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aydın, G., 2014. Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting with Different Types of Granite, Arabian Journal of Geosciences, 7, 10, 4425-4435.
- Aydın, G., 2015. Performance of Recycling Abrasives in Rock Cutting by Abrasive Water Jet, Journal of Central South University, 22, 3, 1055-1061.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2011. An Investigation on the Surface Roughness of the Granite Machined by Abrasive Waterjet, Bulletin of Materials Science, 34, 4, 985-992.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2012. Performance of Abrasive Waterjet in Granite Cutting: Influence of the Textural Properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 24, 7, 944-949.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2013. Prediction of Cut Depth of the Granitic Rocks Machined by Abrasive Waterjet (AWJ)., Rock Mechanics and Rock Engineering, 46, 5, 1223-1235.
- Babu, M.K. ve Chetty O.V.K., 2003. A study on recycling of abrasives in abrasive water jet machining, Wear, 254, 7-8, 763-773
- Bishop, M., 2009. Reusing waterjet cutting abrasive, The Fabricator, 29 Haziran 2009.
- Chadwick, R., Corriveau, J. ve Kurko, M, 1973. Nozzle for Producing Fluid Cutting Jet (Patent), US3756106 A.
- Cosansu, G. ve Cogun, C., 2012. An Investigation on use of Colemanite Powder as Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting, Journal of Mechanical Science and Technology, 26, 8, 2371-2380.
- DIN EN ISO, 2010. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters, 4287:2010-07, DIN German National Standart, Berlin, Germany.

- Ergür, H. S., 2007. Aşındırıcı Su Jetinin Teorik Analizi ve Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Modellenmesi, Doktora Tezi, ESOĞÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Fourness, C.A. ve Pearson, C.M, 1935, Paper metering, cutting, and reeling (Patent), US2006499 A.
- Franz, N.C., 1971., High Velocity Liquid Jet (Patent), US3524367 A.
- Göktan, R.M ve Yılmaz, N.G., 2006. Mermer Üretim ve İşleme Teknikleri, Eskişehir Osmangazi Üni. Müh. Fak. Maden Müh. Bölümü, Eskişehir, 127 s.
- Hallaçoğlu, İ., 1999. Aşındırıcılar, 1. Baskı, Kastaş Yayınevi, İstanbul, 624 s.
- Hashish, M., Kirby., M. ve Pao, Y.H., 1987., Method and Apparatus for Forming a High Velocity Liquid Abrasive Jet (Patent), US4648215 A.
- İnal, S., 2011. Aşındırıcı Katkılı Su Jeti ile Kesmede Çalışma Parametreleri ve Kayaç Özelliklerinin Kesme Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karakurt, İ., 2007. Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinin Kayaç Kesme Performanslarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karakurt, İ., 2011. Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile Kayaç Kesmede Parametrik Değişimlerin ve Malzeme Dokusal Özelliklerinin Kesme Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2010., Su Jeti Teknolojisinin Madencilik Sektöründeki Uygulamalarının Değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 1, 105-112.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2011. Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), Indian Journal of Engineering and Material Sciences, 18, 6, 435-442.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2012. A Study on the Prediction of Kerf Angle in Abrasive Waterjet Machining of Rocks, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 226, 1489-1499.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2012. An Experimental Study on the Cut Depth of the Granite in Abrasive Waterjet Cutting, Materials and Manufacturing Processes, 27, 5, 538-544.



- Kartal, F., 2015. AISI 105 Çeliğinin Aşındırıcı Su Jeti ile Tornalanmasında Farklı Parametrelerin Talaş Kaldırma Oranı ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kulaksız, S. (Ed.), 2012. Doğal Taş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, 3. Baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 636 s.
- Leach, S.J. ve Walker, G.L., 1966. The Application of High Speed Liquid Jets to Cutting, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 260,1110,295-310.
- Maros, Z., 2012. Taper of Cut at Abrasive Waterjet Cutting of an Aluminium Alloy, *Production Processes and Systems*, 5, 1, 55-60.
- Onargan, T., Köse, H. ve Deliormanlı, A.H., 2006. Mermer, 4. Baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 324 s.
- Pi, V. N., 2008. Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting, Master of Engineering, Hanoi University of Technology, Vietnam.
- Rice, P.K., 1965. Process for Cutting and Working Solid Materials (Patent), US3212378A.
- Schwacha, B.G., 1961., Liquid Cutting of Hard Materials (Patent), US2985050 A.
- Summers, D.A., 1995. Waterjetting Technology, First Edition, E & FN Spon, London, UK, 882 s.
- T.C. Ekonomi Bakanlığı, 2016. Doğal Taş Sektörü Sektör Raporları, İhracat Genel Müdürlüğü Maden, Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, Ankara.
- T.C. Resmi Gazete, 3213 Sayılı Maden Kanunu, Başbakanlık Basımevi, 18785.
- Tirrell, L.L., 1939., Sandblast Device (Patent), US 2176577 A.
- URL-1, <http://www.ntso.org.tr/upload/dosya/dosya/3bfbee2ade33cb40ce3b9bc8c280af7.pdf>. 3 Ekim 2016.
- URL-2, [http://www.maden.org.tr/genel/bizden\\_detay.php?kod=120&tipi=5&sube=0](http://www.maden.org.tr/genel/bizden_detay.php?kod=120&tipi=5&sube=0). 3 Ekim 2016.
- URL-3, <http://www.directindustry.com/prod/flow-europe-gmbh/product7051779075.html>. 5 Kasım 2016.
- URL-4, <http://yamasa.com.tr/242/1/4/yamasa/yuzeyolcumparametreleri.aspx>. 13 Kasım 2016.

URL-5, <http://www.avwaterjet.com/aboutWaterjet.php>. 13 Kasım 2016.

Wang, J. and Guo, D.M, 2003. The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics, Journal of Material Processing Technology, 133, 371-377.

Xu, S., 2005., Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining with Controlled Nozzle Oscillation, Doktora Tezi, School of Engineering Systems Queensland University of Technology, Avustralya.

Yüksel, Ö., 2011. Fuğlatepe ve Civarındaki ( Bursa-Orhaneli) Krom Yataklarının Jeolojik, Mineralojik ve Kimyasal Karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



## ÖZGEÇMİŞ

Serkan KAYA, 1981 yılında Eskişehir’de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Eskişehir’de tamamladı. 2011 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü’nden mezun oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya ve 2014 yılında aynı bölümde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen ilgili bölümde lisansüstü eğitimini sürdürmekte olan KAYA’nın yabancı dili İngilizcedir.

