

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GRANİT, CAM, CÜRUF VE BETON ATIKLARININ AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL TAŞ
KESMEDE AŞINDIRICI OLARAK KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Mohammad Reza AMIRI

**EYLÜL 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GRANİT, CAM, CÜRUF VE BETON ATIKLARININ AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL
TAŞ KESMEDE AŞINDIRICI OLARAK KULLANIMI**

Maden Yük. Müh. Mohammad Reza AMİRİ

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 08 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 14 / 09 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gökhan AYDIN

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Bu tez, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Tez çalışması, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen FDK-2021-9301 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Desteklerinden ötürü BAP birimine teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince, akademik alanda ve kişisel gelişimimde büyük katkı sağlayan ve beni yönlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Gökhan Aydın'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme komitemde yer alan ve çalışmalarına yapıcı eleştirileri, önerileri ve yol gösterici yaklaşımlarıyla katkıda bulunan değerli hocalarım, Prof. Dr. İzzet Karakurt ve Prof. Dr. Sultan Öztürk'e de teşekkür ederim. Davetimizi kırmayarak tez savunma sınavında görev alan jüri üyeleri Prof. Dr. Suphi Ural ve Prof. Dr. Muharrem Kemal Özfirat'a ayrıca teşekkür ederim. Tez çalışmalarım süresince pek çok sorunu aşmamı sağlayan Arş. Gör. Dr. Serkan Kaya'ya teşekkürlerimi sunarım. Ek olarak, zaman zaman görüşlerine başvurduğum kıymetli hocalarım Prof. Dr. İbrahim Alp, Doç. Dr. Ferdi Cihangir, Doç. Dr. Kadir Karaman'a ve bölümümüzün tüm akademik ve idari personeline teşekkür ederim. Doktora eğitimimi destekleyen Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı'na, her türlü maddi ve manevi destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatım boyunca kararlarımı ve çalışmalarımı destekleyen sevgili aileme şükranlarımı sunarım.

Mohammad Reza AMIRI

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Granit, Cam, Cüruf ve Beton Atıklarının Aşındırıcılı Su Jeti ile Doğal Taş Kesmede Aşındırıcı Olarak Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gökhan Aydın’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. 14/09/2023.

Mohammad Reza AMIRI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar (ÇİZEGELER) DİZİNİ	XII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.1.1. Türkiye’de ve Dünya’da Doğal Taşların Kullanımı	2
1.2. Doğal Taşların Kesilmesi ve İşlenmesi	2
1.2.1. Levha (Plaka) Hattı Makineleri	3
1.2.2. Fayans Hattı ve Makineleri	4
1.2.3. Yüzey İşleme Yöntemleri	4
1.3. Aşındırıcılı Su Jeti	5
1.3.1. ASJ Sistem Bileşenleri.....	6
1.3.2. ASJ ile Kesmede Başlıca Performans Göstergeleri	8
1.3.3. Aşındırıcılı Su Jetinin Performansına Etki Eden Parametreler.....	10
1.4. Literatür Özeti	11
1.5. Tez Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	17
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	19
2.1. Deney Malzemesi ve Karakterizasyonu	19
2.1.1. İş Parçalarının Özellikleri	19
2.1.2. Aşındırıcıların Hazırlanması	29
2.1.3. Aşındırıcıların Karakterizasyonu	32
2.2. Deney Tasarımı ve Düzenegi	36
2.3. Kesme Sonrası Örneklerin Kesme Geometrilerinin Analizi	38
3. BULGULAR VE İRDELEME	41

3.1. Kesme ve Kesme-Aşınma Derinliği.....	41
3.2. Kesme Genişliği	50
3.3. Malzeme Uzaklaştırma Oranı.....	52
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü	54
3.4.1. SEM Analizleri	60
3.5. Kerf Açısı	64
3.6. Kesme Performans Ölçümlerin Arasındaki İlişkiler ve Aşındırıcıların Performansı	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	72
5. KAYNAKLAR	74
6. EKLER.....	82
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Doktora Tezi

GRANİT, CAM, CURÜF VE BETON ATIKLARININ AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL TAŞ KESMEDE AŞINDIRICI OLARAK KULLANIMI

Mohammad Reza AMIRI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gökhan AYDIN
2023, 90 Sayfa

Bu çalışmada, aşındırıcılı su jeti (ASJ) ile doğal taşların kesilmesinde çeşitli atıklarının (cam, granit, beton ve ferrokrom cürufu) aşındırıcı olarak değerlendirilme potansiyelleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle atıklar çalışma gereksinimlerine uygun boyutlara getirilmiştir. Kesme deneyleri süresince ilerleme hızı dışındaki kesme parametreleri sabit tutulmuştur. Aşındırıcıların kesme performanslarını, kesme derinliği, kesme genişliği, malzeme uzaklaştırma oranı, kerf açısı ve kesme yüzeylerinin kalitesi referans alınarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, düşük ilerleme hızlarında daha yüksek kesme derinliklerinin elde edildiği belirlenmiştir. İlerleme hızındaki değişimlerin diğer performans çıktılarını belirgin bir şekilde etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır. Bunun yanında, yüksek yoğunluk ve mekanik dayanıma sahip iş parçalarında daha düşük kesme derinliklerinin ve malzeme uzaklaştırma oranlarının elde edildiği saptanmıştır. Yüksek sertlik ve yoğunluklu aşındırıcıların ise kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranını arttırdığı belirlenmiştir. Diğer taraftan, ilerleme hızı, aşındırıcı türü ve iş parçası özellikleri ile kesme genişliğini ve yüzey pürüzlülüğü arasında kayda değer bir ilişki tespit edilmemiştir. Ek olarak, düşük dayanım ve sertliğe sahip iş parçaları ve aşındırıcılar için düşük kerf açılarının elde edildiği saptanmıştır. Çalışma sonucunda, ferrokrom cürufu, granit ve camın ASJ ile doğal taş kesme uygulamalarında aşındırıcı olarak değerlendirilebileceği belirlenmiştir. Bu durum, kesilen malzemenin üretim maliyetini azaltacak ve ürünün piyasadaki rekabet gücünü arttıracaktır.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcılı Su Jeti, Aşındırıcı, Atık, Doğal Taş, Kesme

SUMMARY

PhD. Thesis

APPLICATION OF GRANITE, GLASS, SLUG AND CONCRETE WASTES AS
ABRASIVE IN NATURAL STONE CUTTING WITH ABRASIVE WATER JET

Mohammad Reza AMIRI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Gökhan AYDIN
2023, 90 Pages

In this study, the potential use of various wastes (glass, granite, concrete and ferrochrome slag) as abrasive in abrasive water jet (AWJ) cutting of natural stones was investigated. The wastes were firstly processed to provide abrasive grains in the sizes required for AWJ cutting. During the cutting experiments, the cutting parameters except the feed rate were kept constant. The cutting performance of the abrasives was evaluated with reference to cutting depth, cutting width, material removal rate, kerf angle and quality of the cutting surfaces. In the study, it was determined that higher cutting depths were obtained at low traverse speeds. It was concluded that the changes in traverse speed did not significantly affect other performance outputs. In addition, it was determined that lower cutting depths and material removal rates were obtained in work pieces with high density and mechanical strength. It was concluded that high hardness and density abrasives increased the cutting depth and material removal rate. On the other hand, no significant relationship was found between traverse speed, abrasive type and work piece properties, and cutting width and surface roughness. In addition, it was revealed that low kerf angles were obtained for work pieces and abrasives with low strength and hardness. As a result, it was concluded that ferrochrome slag, granite and glass can be considered as abrasive in AWJ cutting of natural stones. This will reduce the production cost of the cut material and increase the competitiveness of the product in the market.

Key Words: Abrasive Water Jet, Abrasive, Waste, Natural Stone, Cutting

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. ASJ bileşenleri (Aydın vd. (2010)'dan uyarlanmıştır).....	6
Şekil 2. ASJ'de kesme kafası bileşenleri (Perotti vd., 2021).	7
Şekil 3. ASJ ile kesmede kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgelerin oluşumu (Hashish, 1995).	8
Şekil 4. Kerf profili (Karakurt vd., 2011).....	9
Şekil 5. Kullanılan doğal taşlar: a) Vitrik Litik Tüf, b) Lamprofir ve c) Kristal Vitrik Tüf	19
Şekil 6. Dijital schmidt çekici tip L.....	22
Şekil 7. Schmidt deneyi için hazırlanmış bloklar, a) Kristal Vitrik Tüf, b) Vitrik Litik Tüf, c) Lamprofir	22
Şekil 8. Disk ve karot örnekleri.....	23
Şekil 9. a) Karot alma makinesi ve b) karot kesme testeresi.....	24
Şekil 10. a) Tek Eksenli Basma Dayanımı ve b) Endirekt Çekme Dayanımı deneylerinin uygulanması	25
Şekil 11. Böhme Aşınma Kaybı deneyi uygulaması	26
Şekil 12. Ultrasonik P-dalga hızı cihazı	27
Şekil 13. Diskli doğal taş kesme makinesi	28
Şekil 14. Kesme deneylerinde kullanılan iş parçaları.....	28
Şekil 15. a) Granit kırıntıları, b) beton atığı ve c) cam atığı (Ferrokrom cürufu toz olarak temin edilmiştir. Sadece elemeye tabi tutulmuştur.).....	29
Şekil 16. Çeneli kırıcı makinesi.....	30
Şekil 17. a) Öğütme makinesi ve b) değirmen çubukları	30
Şekil 18. Otomatik elek makinesi.....	31
Şekil 19. Kesime hazır olan aşındırıcılar: a) Cam, b) Granit, c) Beton ve d) Ferrokrom Cürufu	31
Şekil 20. Garnet aşındırıcının SEM görüntüsü.....	32
Şekil 21. Cam aşındırıcının SEM görüntüsü	33
Şekil 22. Granit aşındırıcının SEM görüntüsü	33

Şekil 23. Beton aşındırıcının SEM görüntüsü	34
Şekil 24. Ferrokrom cürufu aşındırıcının SEM görüntüsü	34
Şekil 25. Piknometre deneyi.....	35
Şekil 26. Kesme deneylerinde kullanılan ASJ.....	36
Şekil 27. Kesime hazır iş parçası.....	37
Şekil 28. ASJ ile kesilmiş bir iş parçası	37
Şekil 29. Kesme genişliğinin ölçümü	38
Şekil 30. Kerf açısı	39
Şekil 31. Diskli kesici kullanılarak iş parçalarının kesilmesi.....	39
Şekil 32. Kesme derinliğinin ölçümü	40
Şekil 33. Dijital pürüzlülük ölçüm cihazı.....	40
Şekil 34. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme derinlikleri.....	42
Şekil 35. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme-aşınma derinlikleri.....	47
Şekil 36. Aşındırıcı çeşidinden bağımsız olarak (tüm verilerin kullanıldığı) kesme ve kesme-aşınma derinliği arasındaki ilişki.....	49
Şekil 37. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme genişlikleri.....	51
Şekil 38. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen malzeme uzaklaştırma oranları.....	53
Şekil 39. Aşındırıcı çeşidinden bağımsız olarak (tüm verilerin kullanıldığı) kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki ilişki.....	54
Şekil 40. Garnet aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri	55
Şekil 41. Cam aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri.....	56
Şekil 42. Granit aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri	56
Şekil 43. Beton aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri.....	57
Şekil 44. Ferrokrom cürufu aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri.....	57
Şekil 45. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri (Lamprofir doğal taşının kesim yüzeylerinden yeterli sayıda pürüzlülük değerleri elde edilemediğinden şekilde yer verilmemiştir)	59

Şekil 46. İş parçası kesme yüzeyinde (Kristal Vitrik Tüf) aşındırıcı tanelerin (cam) yol açtığı mikro çatlama.....	61
Şekil 47. İş parçası (Kristal Vitrik Tüf) yüzeyinde gözlenen mikro sabanlama aşınması...	61
Şekil 48. Kesimden sonra iş parçasının (Vitrik Litik Tüf) yüzeyinde oluşan mikro sabanlama aşınması.....	62
Şekil 49. İş parçasının (Lamprofir) yüzeyinden kopan ve sürüklenen parçacıklar	62
Şekil 50. İş parçası (Kristal Vitrik Tüf) yüzeyinden aşındırıcı parçacıkları (granit) ile malzemenin koparılması sonucu oluşan yüzey	63
Şekil 51. Farklı iş parçalarına ait kesme yüzeylerinin görüntüleri	63
Şekil 52. Garnet aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri.....	64
Şekil 53. Cam aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri	65
Şekil 54. Granit aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri	65
Şekil 55. Beton aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri	66
Şekil 56. Ferrokrom cürufu aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri	66
Şekil 57. ASJ'nin giriş ve çıkış noktalarında meydana gelen çakılma bölgesinin yapısı	67
Şekil 58. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kerf açıları	68

TABLÖLAR (ÇİZEGELER) DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Atıkların oluşum süreçleri ve miktarları	18
Tablo 2. Doğal taşların renk, doku ve tane büyüklükleri	20
Tablo 3. Doğal taşların mineralojik bileşimleri.....	20
Tablo 4. Doğal taşların kimyasal içerikleri (%)	21
Tablo 5. Schmidt çekici deneyinin sonuçları.....	23
Tablo 6. Doğal taşların fiziksel özellikleri	24
Tablo 7. Doğal taşların mekanik özellikleri	27
Tablo 8. Kullanılan atık aşındırıcılara yönelik bazı bilgiler.....	29
Tablo 9. Aşındırıcıların kimyasal içerikleri (%).....	32
Tablo 10. Aşındırıcıların fiziksel özellikleri	35
Tablo 11. Kesme deneylerinin gerçekleştirildiği çalışma koşulları	36
Tablo 12. Kesme deneylerinde kullanılan ASJ'nin özellikleri.....	37
Tablo 13. Kesme derinlikleri (mm)	41
Tablo 14. Ölçülen kesme derinliklerinin değer aralıkları (mm).....	45
Tablo 15. Kesme-aşınma derinlikleri (mm)	46
Tablo 16. Maksimum ve minimum kesme-aşınma derinliği (mm)	48
Tablo 17. Kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği oranı	49
Tablo 18. Farklı aşındırıcı tipleri için kesme ve kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyon katsayıları	49
Tablo 19. Kesme genişliği değerleri (mm).....	50
Tablo 20. Malzeme uzaklaştırma oranları (mm ³ /sn)	52
Tablo 21. Farklı aşındırıcı tipleri için kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki korelasyon katsayıları.....	54
Tablo 22. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra, µm)	58
Tablo 23. Kerf açıları (°)	67
Tablo 24. Kesme performans ölçütlerinin birbirleri arasındaki korelasyon katsayıları	69
Tablo 25. Aşındırıcıların kesme performans ölçütlerine göre sıralaması.....	70
Tablo 26. Aşındırıcıların garnete göre performansları	71

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
ASJ	: Aşındırıcılı Su Jeti
CNC	: Bilgisayarlı sayısal kontrol
EPA	: Environmental Protection Agency
ISRM	: International Society for Rock Mechanics
MTA	: Maden Tetkik ve Arama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
XRD	: X Işını Kristalografisi (X-Ray diffraction analysis)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Sağladığı avantajlar (yüksek verimlilik, düşük üretim maliyeti vd.), madencilik çalışmalarında mekanize araçların kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Ancak, üzerinde çalışılan formasyonun sertlik özelliklerine bağlı olarak yöntemin uygulanmasında çeşitli problemlerle (kesici uçlarda aşırı aşınma, üretim hızında düşüş, maliyet artışı vb.) karşılaşılabilir. Aşındırıcı uçlara sahip bileşenler (dairesel testere, katrak vd.) doğal taş işleme tesislerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kesme araçlarının kullanıldığı uygulamalarda belirli periyotlarda kesicilerin değiştirilmesi gerekmektedir. Bu durum maliyeti arttırmakta ve zaman kaybında neden olmaktadır. Bunun yanında, bu teknolojilerin yüksek spesifik enerji ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca, kesici kalınlığına bağlı olarak malzeme kaybı yaşanmaktadır (Yurdakul vd., 2014). Belirtilen sorunların önlenmesi ya da azaltılması adına ilgili teknolojiler iyileştirilmekte ve alternatif yöntemler geliştirilmektedir.

Aşındırıcı su jeti (ASJ) ile kesme bu alternatif yöntemlerden birisidir. Su jetleri, doğal taş plakaları için uygulanan boyut küçültme süreçlerinde (yan kesme, baş kesme vd.) kullanılabilir. Bunun yanında, doğal taş yüzeylerine görsel zenginlik katmak amacıyla kullanıldığı uygulamalarda mevcuttur (Engin, 2006; Akkurt, 2004). ASJ kesme teknolojisi birçok avantajına sahiptir. Doğal taşların yüzeylerinde yüksek sıcaklık kaynaklı deformasyon, renk değişimi vb. durumlar meydana gelmez. Doğal taşlar, yüksek sıcaklıklar oluşturulmadan etkili bir şekilde kesilebilir. Su jetinin diğer bir avantajı ise düşük kesme genişliklerine imkân sağlamasıdır. Bu durum, malzeme kaybının azaltılması açısından önem arz etmektedir. Diğer yandan, geleneksel kesme yöntemlerinde kesici bileşenlerde meydana gelen aşınmalar, bu teknolojiye söz konusu olmamaktadır. Ek olarak, ASJ ile doğal taşların kesimi esnasında toz oluşumu gözlenmemektedir.

ASJ ile kesme uygulamalarında en fazla kullanılan aşındırıcı garnet'tir (Coşansu, 2010). ASJ ile doğal taşların kesilmesinde aşındırıcı olarak değerlendirilebilecek çeşitli atıklar (granit, cam, beton ve cüruf) bulunmaktadır. Bu atıkların ASJ'de kullanılması ile bazı avantajlar elde edilebilir (aşındırıcı maliyetleri azalması, doğal kaynakların korunması vb.).

1.1.1. Türkiye’de ve Dünya’da Doğal Taşların Kullanımı

Doğal taşların insanlar tarafından kullanımı binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Bu dönemlerde insanlar doğal taşları barınma ve savunma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla kullanmışlardır. Uygarlaşma seviyesine bağlı olarak doğal taşlar farklı amaçlarla (görsel amaçlı) kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde doğal taşlar farklı sektörlerde, özellikle binaların iç ve dış dekorasyonunda, süs eşyaları ve anıtların yapımında, camilerde ve farklı inşaat faaliyetlerinde kullanılmaktadır.

Türkiye’de doğal taş sektörü son yıllarda önemli bir gelişme (yatırım vb.) göstermiştir. Bu gelişimin bir sonucu olarak doğal taşların kullanımında artış kaydedilmiştir (Değerli, 2014). 1968 yılında Türkiye’de üretilen toplam doğal taş miktarı 70000 ton/yıl iken, 2016 yılında bu değer 11,5 milyon ton/yıl’a ulaşmıştır (Arıkan, 1968; Onargan vd., 2006; T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Görünür rezervi yaklaşık 13,9 milyar ton (5,1 milyar m³) olan dünya toplam doğal taş rezervinin yaklaşık %33’ünün Türkiye’de bulunduğu tahmin edilmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021). Türkiye’de 80’den fazla farklı yapıda ve 120’den fazla farklı renk ve desende doğal taş rezervleri tespit edilmiştir. Elâzığ Kiraz, Denizli Traverten, Manyas Beyaz, Bilecik Bej, Akşehir Siyah, Kaplan Postu, Ege Bordo, Milas Leylak, Süpren, Gemlik Dişbaz ve Afyon Şeker uluslararası piyasada en çok tercih edilen doğal taş çeşitleridir (Aydın vd., 2012).

Türkiye’nin doğal taş ihracatı, ülkenin toplam ihracat gelirine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Maden Tetkik ve Arama Başkanlığı Raporuna göre 2020 yılında Türkiye’nin madencilik ihracatı yaklaşık 4 Milyar ABD Doları olurken, doğal taş ihracatının değeri 1,71 Milyar Dolarlık bir seviyesindedir (Kokarcılı & Köksal, 2022; URL-1). Türkiye’nin doğal taş sektöründeki dış ticaretinde ilk sırada yer alan ülke %37,3’lük pay ile Çin’dir. Çin’i sırasıyla Amerika Birleşik Devletleri, Suudi Arabistan, Hindistan, İsrail, Irak, Fransa, Birleşik Arap Emirlikleri, Avustralya, Almanya ve diğer ülkeler takip etmektedir (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

1.2. Doğal Taşların Kesilmesi ve İşlenmesi

Üretim bölgesinden fabrikaya gönderilen bloklar üzerinde boyut küçültme işlemleri uygulanır. Doğal taş tesislerine gelen bloklar ihtiyaç duyulan uç ürünün özelliklerine bağlı

olarak çeşitli süreçlerden geçerler. Bu süreçleri iki ana bölüm olarak sınıflandırmak mümkündür (Karakurt, 2007):

- i. Levha (Plaka) Hattı: Katrak, köprü kesme makineleri ve plaka silim (geniş bant cila) makineleri
- ii. Fayans Hattı: S/T, baş kesme makineleri, cilalama makineleri, ebatlama makineleri, yan kalibre ve kanal açma makineleri

1.2.1. Levha (Plaka) Hattı Makineleri

Büyük boyutlu ürünlerini elde etmek için kullanılırlar. Plaka kalınlığı, doğal taşın özelliklerine ve kullanım amacına bağlı olarak farklılık arz edebilir (2-3 cm genellikle). Plakaların uzunluk ve genişlikleri ise doğal taşın türüne, doğal taş ocağının özelliklerine ve kullanılan kesme teknolojisine bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, plakalar yaklaşık 2-3 metre yüksekliğinde ve 3-5 metre genişliğinde olabilmektedir.

Katraklar, doğal taş endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir kesme tekniğidir. Doğal taş blokları, elmas kesicilerin ileri geri hareketi ile aşındırılmaktadır. Aşındırma işleminin düşey düzlemde devam ettirilmesiyle de doğal taş bloğu plakalara ayrılmaktadır. Katrak makinesi üzerinde 3-4 m uzunluğunda ve çok sayıda kesici takılabilmektedir. Standart bir kesici 3-3,5 mm kalınlığında ve 180 mm yüksekliğindedir (Wang & Rolf, 2003; Onargan vd., 2006).

Köprü kesme makinesi, doğal taş plakalarının farklı boyutlara getirilmesinde kullanılmaktadır. Farklı yönlerde hareket edebilen bir kesici gövde üzerine yerleştirilmiş dairesel testere ile kesme işlemini gerçekleştirmektedir (Gülaçtı & Durak, 2019).

Plaka Silim (Geniş Bant Cila) Makineleri, çoğunlukla 200 cm genişliğindeki plakaların parlatılması için kullanılır. Bu makine, çok sayıda (4 ile 16 tane) silim kafasına sahiptir (URL-2). Her bir kafanın başında pürüzlülük azaltıcı aşındırıcılar bulunmaktadır. Bu kafalar, dairesel bir şekilde hareket ederek plaka yüzeyine kuvvet uygulamakta ve plakanın pürüzlülüğünün azaltılmasını sağlamaktadır. Eş zamanlı olarak plaka konveyör sistemi ile ileriye doğru taşınmaktadır. Böylelikle, plakaların düzgün ve parlak bir yüzeye sahip olması sağlanmaktadır (T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, 2011).

1.2.2. Fayans Hattı ve Makineleri

Fayans boyutlu ya da özel boyutlu ürünlerin üretiminde kullanılmaktadırlar.

S/T (Strip & Trim) makineleri genellikle düzensiz olan doğal taş bloklarından ürünler elde etmek için kullanılırlar. S/T makineleri, dairesel testereleler kullanarak kesme işlemini gerçekleştirmektedir.

Baş Kesme Makineleri, S/T makinelerinden elde edilen ürünlerin uzunluklarının belirlenmesinde kullanılırlar. İş parçasının beslenme yönüne dik olarak ileri ve geri hareket edebilen bir dairesel testere ile kesme işlemi gerçekleştirilir. Yaklaşık olarak 75 cm genişliğe kadar kesim yapma kapasitesine sahiptirler. S/T makinelerine yakın konumlandırılırlar. Bu durum iş gücü verimliliğini arttırmaktadır (Karakurt, 2007). Doğal taş ürünlerinin uzun kenarları ise dairesel testere içeren yan kesme makineleri ile kesilmektedir (Altaş, 2006).

Cila Makineleri, fayans hattı kalibreli cila makinelerinde, doğal taş ürünleri yatay bir tabla üzerinde ilerler. Üzerinde aşındırıcılar bulunan kafalar doğal taş ürünlerinin yüzeyine belirli bir basınçta dairesel hareket uygular. Fayans hattı makinelerinde önce kalibre kafaları bulunur. Daha sonra silim kafaları yerleştirilmiştir. Fayans hattı kalibreli cila makineleri bu kafa sayılarına göre adlandırılır. Fabrikalarda genellikle 2+8 (2: kalibre yapan kafa sayısı ve 8: silim yapan kafa sayısı) ve 3+12 kafalı bantlı silim makineleri kullanılmaktadır (T. C. Millî Eğitim Bakanlığı, 2011).

1.2.3. Yüzey İşleme Yöntemleri

Yüzey işleme, doğal taş fabrika süreçlerinin son aşamasıdır. Doğal taş fabrikalarında farklı doğal taşlar için değişik yöntemler kullanılmaktadır. Aşağıda bu yöntemler hakkında kısa bilgiler verilmektedir:

- i. Mekanik darbeli yüzey işleme (Çekiçleme): Doğal taş yüzeyinde darbe etkisiyle çukur bölgeler oluşturma esasına dayanan bir yöntemdir.
- ii. Isıl yüzey işleme: Doğal taşların yüzey özelliklerini değiştirmek için yüksek sıcaklıkların kullanıldığı bir yöntemdir. Bu işlem, farklı termal genleşme katsayısına sahip mineraller içeren doğal taşlarda (granit ve bazalt gibi) kullanılmaktadır. Doğal taş yüzeyinde düşük erime noktasına sahip olan

mineraller erimekte ve doğal taşta pürüzlü bir yüzey oluşmaktadır (Çelik ve Kavuşan, 2001; Karakurt, 2007).

- iii. Lazerle yüzey işleme: Yüksek yoğunluktaki ışık demeti çok küçük bir alana uygulanır. Işık demetinin çarptığı alanda ani bir ısınma meydana getirir. Işık demetinin yoğunluğu ve yüzeyle temas süresine bağlı olarak ilgili yüzeylerde erime, buharlaşma, renk değişimi vb. değişimler meydana gelir (Karakurt, 2007).
- iv. Parlatma işlemi, amaca uygun olarak sıralanmış aşındırıcılar ve kimyasal eriticilerin bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Parlatma işlemiyle doğal taşın rengi daha belirgin hale getirilir (Ozuloğul & Erdoğan, 1995; Başyigit, 2012).
- v. Kumlama yüzey işleme: Doğal taş yüzeylerinde mat-parlak pürüzlü ve desenli bir yapı oluşturulması için uygulanır. Su ve kum karışımı, yüksek basınçta doğal taş yüzeyine püskürtülür. Doğal taş yüzeyine kum tanelerinin çarpması ile yüzeyde küçük boyutlu çukur ve tümsekler oluşturur (Çelik & Kavuşan, 2001).

1.3. Aşındırıcılı Su Jeti

Geniş anlamda su jeti, malzemeleri kesmek için yüksek basınçlı su jeti kullanan bir makinedir. Su jetleri ile farklı dayanımlardaki malzemelerin (karton, kauçuk, metal, doğal taş vd.) kesilebilmesi mümkündür. Su jetlerinin saf ve aşındırıcılı su jeti olarak iki çeşidi bulunmaktadır. Saf su jetlerinde, jet sadece su içermektedir. Saf su jetleriyle, plastik ve köpük gibi sertliği yüksek olmayan malzemelerin kesimi gerçekleştirilmektedir. Sert malzemelerin kesilmesinde kullanılan ASJ’de ise jet, su ve aşındırıcı taneciklerden oluşmaktadır. Aşındırıcı tanecikler 800 m/sn’lik hızlara kadar hızlandırılmaktadır. Yüksek hızlarda iş parçası üzerine çarpan aşındırıcılar temas yüzeylerinde erozyon meydana getirirler. ASJ kesme uygulamalarında yaygın olarak kullanılan aşındırıcı garnet’tir.

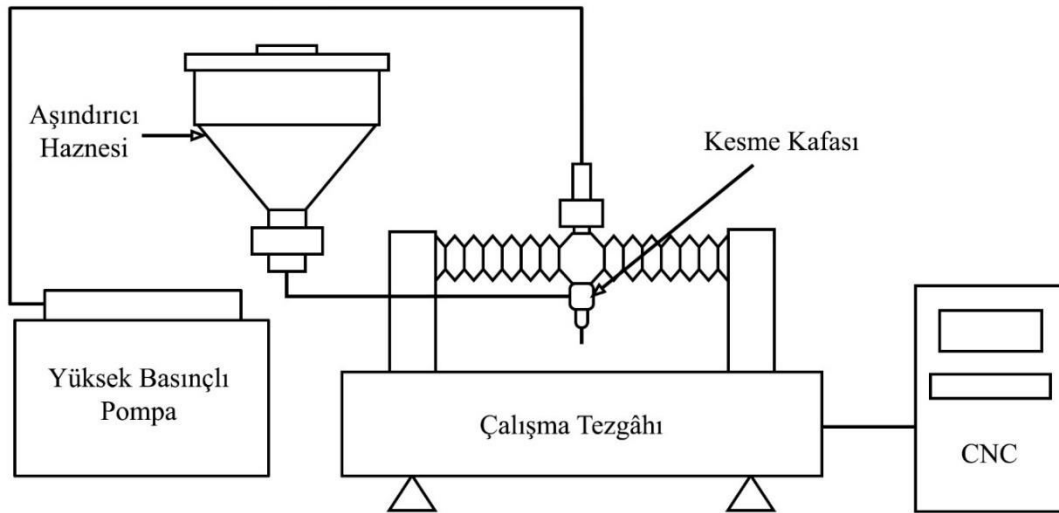
ASJ’nin başlıca avantajları aşağıdaki gibidir:

- i. ASJ ile neredeyse her türlü malzeme kesilebilmektedir ve daha az çevresel etkiye sahiptir.
- ii. Kesme sonucu elde edilen yüzeylerin kalitesi (özellikle fazla derin olmayan kesimler için) mükemmeldir.

- iii. Farklı geometrili kesim palanlarına imkân sağlar.
- iv. Kesme genişliği diğer kesim yöntemlerine göre daha azdır (daha az malzeme israfı).
- v. Kesim yüzeylerinde ısıl etkinin yaratacağı deformasyonlar (renk değişimi vb.) gözlenmez.

1.3.1. ASJ Sistem Bileşenleri

Temel olarak, ASJ yüksek basınçlı pompa, aşındırıcı enjeksiyon sistemi, kesme kafası ve CNC kontrol sisteminden oluşmaktadır. ASJ'nin genel görünümü, Şekil 1'de sunulmaktadır.



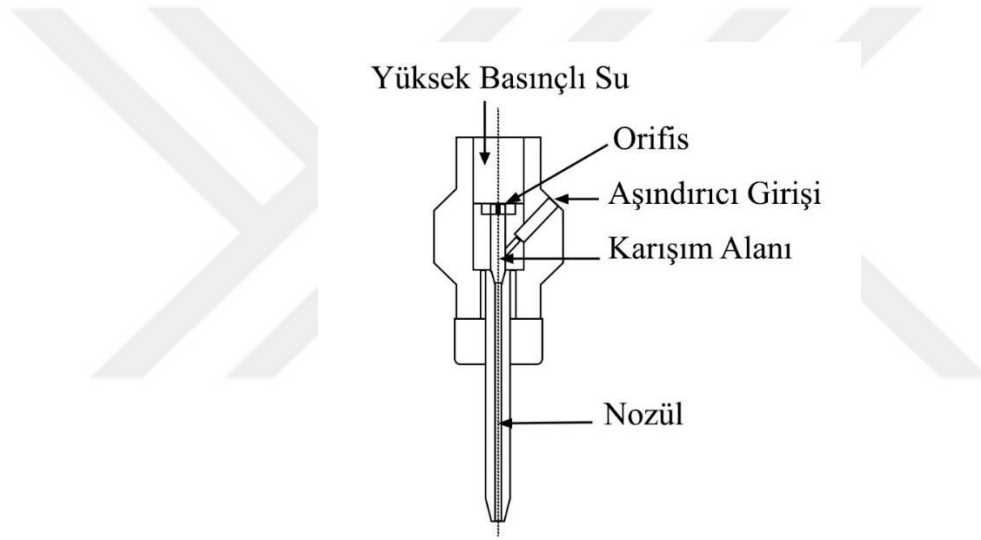
Şekil 1. ASJ bileşenleri (Aydın vd. (2010)'dan uyarlanmıştır).

Yüksek basınçlı pompa: Yüksek basınçlı pompa, su jeti makinesinin ana bileşenidir. Pompa, suyu 400 MPa basınca kadar sıkıştırır. Su, yüksek basınca dayanıklı boru sistemleri içerisinde hareket etmektedir. Yüksek basınçlı su kesme kafasına iletilir ve nozülünden yüksek hızla püskürtülür.

Aşındırıcı enjeksiyon sistemi: aşındırıcı partiküllerin su jeti akışına homojen ve kontrol edilebilir bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Aşındırıcı enjeksiyon sistemi, aşındırıcı besleme haznesi, aşındırıcı ölçüm sistemi ve dağıtım borusunu içermektedir. Aşındırıcı

besleme haznesi, aşındırıcıları depolamak için bir konteyner görevi görür. Aşındırıcıların kütle akış hızı valfler aracılığıyla kontrol edilir. Aşındırıcı dağıtım borusu ise, aşındırıcı parçacıklarını kesme kafasına taşımaktadır (Santhanakumar, 2018).

Kesme kafası: Orifis, karışım alanı ve nozuldan oluşmaktadır. İlk aşamada, yüksek basınçlı su küçük çaplı orifis deliğinden girerek dar bir jet oluşturur. Yüksek basınçlı su jeti akışı, delikten çıkarken karıştırma odasında bir vakum etkisi meydana getirir. Bu etki, aşındırıcıyı karışım alanına çeker ve aşındırıcıyı su akışına sürükler. Jet nozulu, yüksek basınçlı jeti (su + aşındırıcı taneler) kesme hattına yönlendiren bir bileşendir. Tipik bir nozul deliğinin çapı 0.25-0.50 mm'dir (Santhanakumar, 2018). Nozul genellikle safir, elmas veya karbür malzemelerden yapılır ve yüksek aşınma direncine sahiptir (Şekil 2).



Şekil 2. ASJ'de kesme kafası bileşenleri (Perotti vd., 2021).

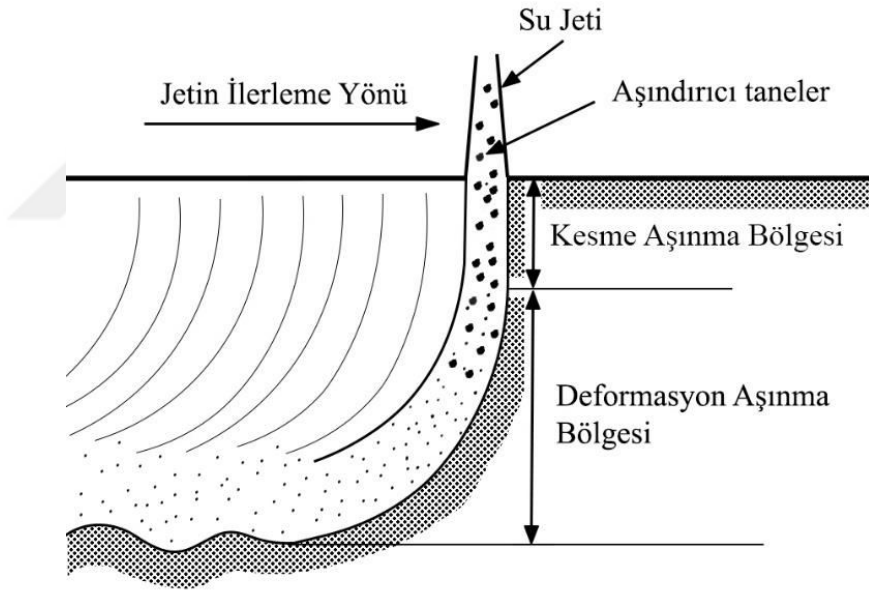
Nozuldan çıkan yüksek basınçlı jetin, kesilecek iş parçası ve etrafındaki çalışanlara zarar vermemesi amacıyla bir çalışma tezgâhı kullanılır. Tezgâh ayrıca içerisinde biriken suyun tekrar kullanımına ve aşındırıcı taneciklerin geri kazanımına olanak sağlar (Karakurt, 2007).

CNC kontrol sistemi: ASJ'de kullanılan CNC sistemleri, kesme işleminin hassas ve otomatik olarak gerçekleştirilmesini sağlar. CNC kontrol sistemi, iş parçasının doğru şekilde pozisyonlanmasını, kesme hızının ve basıncının ayarlanmasını ve karmaşık kesme geometrilerinin uygulanmasını mümkün kılar.

1.3.2. ASJ ile Kesmede Başlıca Performans Göstergeleri

Kesme derinliği, kesme genişliği, kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğü ASJ kesme performansını belirleyen önemli göstergelerdir.

Kesme derinliği, kesme işlemi sırasında jetin nüfuz ettiği malzeme kalınlığını ifade eder ve kesme işleminin başarısı ile ilgilidir. Kesme derinliği, incelendiğinde iki tür kesme bölgesi (kesme-aşınma bölgesi ve deformasyon-aşınma bölgesi) içermektedir. Kesme-aşınma bölgesinde, jetin enerjisi ve hızı yüksektir. Bu bölgedeki yüzeyler, daha az pürüzlülüğe sahiptir (Kaya, 2022). İdeal kesme derinliği, kesme-aşınma bölgesinde elde edilir. Deformasyon-aşınma bölgesinde ise jet daha düşük enerjide kesme işlemini gerçekleştirir. Deformasyon-aşınma bölgesinde, iş parçası yüzeyinde düzensiz aşınma ve yüksek yüzey pürüzlülükleri elde edilir (Şekil 3).



Şekil 3. ASJ ile kesmede kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgelerinin oluşumu (Hashish, 1995).

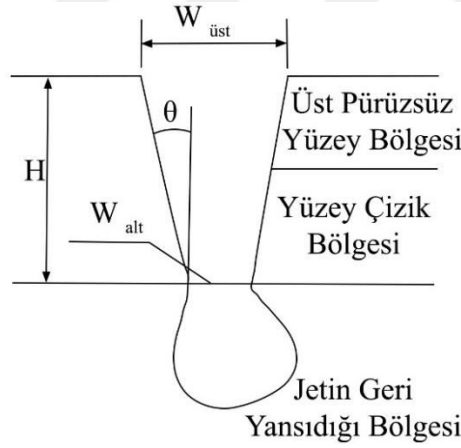
Kesme genişliği, jet tarafından oluşturulan yarığın üst genişliğidir. Kesme genişliğinin fazla olması, malzeme kaybına yol açmaktadır. Bu temelde, üretim maliyeti ve verimliliği açısından önemli bir etkiye sahiptir.

Kerf açısı, kerf profilinin tanımlanmasında yaygın olarak kullanılan bir performans göstergesidir. ASJ kesme işleminde, jet iş parçası üzerinde bir yarık (kerf) oluşturur. Bu

yarığa kerf denir. Kerf genişliği malzemenin üst kısmında ve alt kısmında farklıdır. (Hashish & Plessis, 1979; Karakurt, 2011; URL-3) (Şekil 4). Üst kerf genişliği ve alt kerf genişliğinin birbirlerine yakın olduğu zaman, kerf açısı 0 dereceye yaklaşır. Kesim yüzeylerinin birbirlerine olan paralelliği artar. Bu yüzden kerf açısının 0°'ye yakın olması istenen (kesme yüzeylerinin düzenlenmesi için gerekebilecek ikincil işlemleri minimize eder) bir durumdur. Kerf açısı aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır:

$$\theta = \tan^{-1} [(W_{\text{üst}} - W_{\text{alt}}) / H] \quad (1)$$

Burada, $W_{\text{üst}}$ üst kerf genişliği, W_{alt} alt kerf genişliği, H ise iş parçasının üstünden jetin geri yansıdığı bölgesine varmadan bir değer ve θ kerf açısı olarak tanımlanır.



Şekil 4. Kerf profili (Karakurt vd., 2011).

Yüzey kalitesi, bir ürünün teknolojik kalitesini ölçen ve üretim maliyetini büyük ölçüde etkileyen bir faktördür. Bu, malzeme işlendikten sonra kesme yüzeyinde bulunan doku ve düzensizliklere işaret etmektedir. Pürüzsüz ve tutarlı bir yüzey, yüksek kaliteli bir kesme işlemine işaret etmektedir. Kesme yüzeylerinin kalitesi yüzey pürüzlülüğü ve yüzey dalgalılığıyla karakterize edilebilir (Oberg vd., 2004; Karakurt, 2011; Kaya, 2016). Yüzey pürüzlülüğü, kesme yüzeylerindeki mikro düzensizlikleridir. Kesme-aşınma bölgesi üzerindeki yüzeylerden elde edilir ve bu yüzeylerin analiz edilmesi için kullanılır. Yüzey dalgalılığı deformasyon-aşınma bölgesi yüzeylerinde gözlenen makro boyutlu düzensizliklerdir.

1.3.3. Aşındırıcılı Su Jetinin Performansına Etki Eden Parametreler

ASJ'nin performansını etkileyen parametreleri başlıca iki gruba ayrılmak mümkündür:

- i. Kesim Parametreleri: Nozul-örnek mesafesi, ilerleme hızı ve su jeti basıncı
- ii. Aşındırıcı Parametreleri: Aşındırıcıların çeşidi, aşındırıcıların kütle akışı hızı

Nozuldan çıktığı andan itibaren, jet çapı büyümektedir. Nozul-iş parçası mesafesinin artmasıyla bu büyüme daha da artmaktadır. Bunun sonucu olarak kesme genişliği ve kerf açısı da artmaktadır. Diğer taraftan, nozul-iş parçası mesafesinin artması ASJ'nin kinetik enerjisinin ve kesme-aşınma bölgesini derinliğinin azalmasına neden olmaktadır (Coşansu, 2010). Elde edilen yüzey kalitesini iyileştirmek için ASJ uygulamalarında nozul-iş parçası mesafesi genellikle 1-4 mm olarak seçilmektedir (Santhanakumar, 2018; Karakurt vd., 2011b). Diğer bir kesme parametresi olan ilerleme hızındaki artış, birim zamanda yüzeye gelen aşındırıcı miktarının düşmesi anlamına gelmektedir. Bunun bir sonucu olarak, kesme-aşınma bölgesinin derinliği azalmakta, yüzey pürüzlülüğü/dalgallılığı ise artmaktadır (Karakurt vd., 2011b). ASJ basıncı, kesim yüzeyi kalitesini belirleyen önemli parametrelerden biridir. ASJ basıncı, kesme derinliğiyle de doğrudan ilişkilidir. Bununla birlikte, ASJ basıncının artmasıyla, enerji tüketimi ve aşındırıcı malzeme kullanımı da artmaktadır. Bu maliyetleri arttıran bir durumdur. Bu nedenle, ASJ basıncı, en uygun kesme sonuçlarını elde etmek için diğer kesme parametreleri göz önünde bulundurularak belirlenmelidir (Hashish, 1989; Summers, 1995; Karakurt, 2012; Kaya, 2016).

Aşındırıcıların boyutları, şekilleri, sertlikleri, kütle akışı hızları ASJ'nin kesme performansını etkileyen önemli aşındırıcı parametreleridir. Aşındırıcı tipinin seçimi, uygulama şekline (kesme-yüzey işleme), iş parçasının özelliklerine ve aşındırıcı maliyetine bağlıdır. Aşındırıcı malzemeler, genel olarak yüksek sertlik ve makul kırılma tokluğu ile karakterize edilmektedir. Endüstrilerde garnet, silisyum karbür, alüminyum oksit, elmas, vb. aşındırıcı malzemeler kullanılmaktadır. Ohman'a (1993) göre, iş parçasının kesilmesinde iri taneli aşındırıcılar daha hızlı bir şekilde kesim yapabilmektedir. Diğer taraftan, ince taneli aşındırıcılar daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sağlamaktadır. Ayrıca keskin köşeler ve düzensiz tane yapısı olan aşındırıcılar kesme işlemini kolaylaştırmaktadır (Coşansu,

2010). En çok tercih edilen aşındırıcı boyutu 80 mesh'dir. Aşındırıcıların diğer bir önemli özelliği darbe dayanımıdır. Elmas gibi çok sert malzemeler yüksek darbe dayanımına sahip olmayabilir (Kulaksız, 2012). Bunun yanında, aşındırıcıların kütleli akış hızı, malzeme uzaklaştırma oranını etkileyen önemli kesme parametrelerindendir. Aşındırıcı kütle akış hızının belirli bir değerine kadar malzeme uzaklaştırma oranı artmaktadır. Bu değerden sonra ise kesme performansı kötüleşmektedir (aşındırıcı-aşındırıcı çarpışması, meme tıkanması ve benzer etkilerden dolayı) (Santhanakumar, 2018).

1.4. Literatür Özeti

Hashish (1984), kesme derinliği ve yüzey kalitesi üzerinde ASJ parametrelerinin (su jeti basıncı, nozul çapı, aşındırıcı tipi ve tane boyutu, aşındırıcı besleme miktarı, ilerleme hızı ve geçiş sayısı) etkilerini incelemiştir. Kerf profilinin oluşturmada birden fazla kesme rejiminin rol oynadığı belirlenmiştir. Bu rejimler sonucunda kesme yüzeylerinde kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgelerinin oluştuğu vurgulamıştır. Çalışmada, esnek metallerin verimli ve yüksek kaliteli işlenmesi için bir model geliştirilmiştir.

Arola & Ramulu (1994), aşındırıcı boyutu ve nozul-iş parçası mesafesinin, iş parçasının (grafit/epoksi laminat) yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktörler olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, aşındırıcı boyutunun azalmasına bağlı olarak kerf açısının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Araştırmacılar, nozul-iş parçası mesafesinin artmasıyla jetin genişliğinin arttığını, enerjisinin ise azaldığını tespit etmişlerdir.

Siores vd. (1996), kesme kafası salınım tekniği kullanılarak iş parçasının (seramik) kesimini gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, ilgili teknikle kesme-aşınma bölgesi derinliğinin %30 arttırıldığını belirlemişlerdir. Diğer taraftan, salınım hareketinin yüzey pürüzlülüğünü ve dalgalılığını azalttığı sonuca ulaşmışlardır.

Momber (1998), yüksek sertlikteki aşındırıcılarla daha fazla kesme derinliklerinin elde edilebileceğini belirtmiştir. Araştırmacı, sertliği yüksek aşındırıcıların kullanıldığı kesimlerde yüksek ilerleme hızlarının kullanılabileceğini belirlemiştir.

Wang & Wong (1999), ASJ'nin üzerinde çalıştıkları iş parçasının (çelik) kesimi uygun bir teknoloji olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, malzeme uzaklaştırma oranının arttırılması için nozul-iş parçası mesafesinin fazla olmaması gerektiğini belirtmişlerdir.

Bunun yanında, ASJ kesme performansının tahmini ve optimizasyonu için modeller sunmuşlardır.

Momber & Kovacevic (2000), 2024 alüminyum alaşımasının kesilmesinde aşındırıcı boyutunun yüzey pürüzlülüğünü ve kesme derinliğini etkilediğini belirlemişlerdir. Araştırmacılar, kesme derinliği boyunca yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Chen vd. (2002), ASJ kesme işleminin temel eksikliklerinden birinin, göreceli olarak kalın iş parçalarında oluşan dalgalı-çizikli yapı olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ilgili yapıların minimize edilebilmesi adına farklı nozul salınım teknikleri geliştirilmişlerdir. Çalışmada, nozul salınım tekniklerinin kesim yüzeylerinin (iş parçası: 20 mm kalınlığındaki çelik levhalar) kalitesini önemli ölçüde (%200'den daha fazla) iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Babu & Chetty (2003), ASJ ile iş parçasının (alüminyum) kesiminde aşındırıcıların geri kazanımına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar, geri dönüştürülen aşındırıcılarla gerçekleştirilen kesimlerde daha düşük kerf açıları elde etmişlerdir. Çalışmada, geri dönüştürülen aşındırıcıların %81'inin yeniden kullanılabilir nitelikte olduğu belirlenmiştir.

Chen & Siores (2003), farklı iş parçalarının (alümina seramik, perspeks, hafif çelik ve alüminyum) kesim yüzeylerini taramalı elektron mikroskobu kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada, aşındırıcı tanelerin jet içindeki dağılımlarının çizikli-dalgalı yüzey oluşumu üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Akkurt vd. (2004), farklı malzemelerin (ticari saf alüminyum, Al-6061 alüminyum alaşımı, pirinç-353, AISI 1030 ve AISI 304 paslanmaz çelik) ASJ ile kesiminde, ilerleme hızındaki azalmaya bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirlemişlerdir. Araştırmacılar, kesme derinliği boyunca yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Hasçalik vd. (2007), ilerleme hızının yüzey morfolojisi (iş parçası: Ti-6Al-4V alaşımı) üzerinde önemli bir parametre olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada, ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak kerf açısı ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir.

Fowler vd. (2009), yüksek ilerleme hızlarında iş parçasına daha az aşındırıcının temas ettiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, bu durumun malzeme uzaklaştırma oranını azalttığını

ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, aşındırıcı sertliğindeki artışla beraber yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Akkurt (2010), düşük ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünü azalttığını belirtmiştir (iş parçası: pirinç alaşımı). Kesme derinliğinin üst bölgelerindeki yüzeylerin daha iyi kalitede olduğu gözlemlenmiştir.

Aydın vd. (2010), kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır (iş parçası: granit). Deneylerde istatistiksel olarak tasarlanmış bir deney programı kullanılmıştır. Çalışmada, nozul-iş parçası mesafesi ve ilerleme hızı kesme performansını etkileyen önemli faktörler olarak belirlenmiştir. İlerleme hızı ve nozul-iş parçası mesafesindeki artışın yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Karakurt vd. (2010), aşındırıcı besleme miktarı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli kesme parametreleri olduğunu belirlemişlerdir (iş parçası: granit).

Jankovic vd. (2011), yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrelerin ilerleme hızı ve aşındırıcı besleme miktarı olduğunu belirlemişlerdir (iş parçası: 6060 alüminyum alaşımı). Araştırmacılar, ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmada, aşındırıcı besleme miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Karakurt vd. (2011a), kesme derinliğini etkileyen parametrelerinin ilerleme hızı, aşındırıcının besleme miktarı ve tane boyutu olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca bütün kesme parametrelerinin kerf açısı üzerine etkili olduğunu tespit etmişlerdir (iş parçası: granit).

Karakurt vd. (2011b), kerf açısı üzerinde etkiye sahip en önemli parametreyi ilerleme hızı olarak tanımlamışlardır (iş parçası: granit). İlerleme hızını sırasıyla, nozul-iş parçası mesafesi, aşındırıcı boyutu ve aşındırıcı besleme miktarı izlemiştir. Çalışmada, yüksek oranlarda alkali feldspat ve kuvars içeren iş parçalarında daha yüksek kerf açıları elde edilmiştir. Yüksek oranlarda plajiyoklaz içeren ve tek eksenli basınç dayanımı yüksek olan iş parçalarında ise daha düşük kerf açıları elde edilmiştir.

Zhang vd. (2011), kesme yüzeylerinde oluşan çizgi izlerini incelemişlerdir (iş parçası: cam). Araştırmacılar, çizgilere jetin titreşiminin neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün kesme hızı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Aydın vd. (2011), su basıncı ve aşındırıcı besleme miktarının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörler olduğu belirlenmiştir (iş parçası: granit). İş parçalarının tane

boyutu ile yüzey pürüzlülüğü arasında tutarlı bir ilişki gözlemlenmiştir. İnce taneli iş parçalarında daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilirken, iri taneli iş parçalarında daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir.

Aydın vd. (2012), en yüksek kesme derinliklerini ince taneli iş parçalarında elde etmişlerdir (iş parçası: granit). Çalışmada, en yüksek yüzey pürüzlülükleri ise ince taneli iş parçalarında elde edilmiştir. Ayrıca, iri taneli granitlerde daha yüksek kerf açılarının elde edildiği kaydedilmiştir.

Coşansu & Cogun (2012), çeşitli iş parçalarının (Al7075, mermer, cam, Ti6Al4V ve kompozit malzemeler) kesilmesinde aşındırıcı olarak kolemanit tozunu kullanmışlardır. Çalışmada, yüksek ilerleme hızlarının yüzey pürüzlülüğünü, yüzey dalgalılığını ve kerf açısını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak, aşındırıcı besleme miktarındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü, yüzey dalgalılığını ve kerf açısını azalttığı tespit edilmiştir. Kolemanit tozu kullanımının yüzey pürüzlülüğünü, yüzey dalgalılığını ve kerf açısını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir.

Engin (2012), Shore sertliği, Böhme yüzey aşınma direnci ve yoğunluğun, kesme derinliğini en çok etkileyen doğal taş özellikleri olduğunu belirlemiştir (iş parçası: 42 farklı doğal taş). Ayrıca, su basıncı ve ilerleme hızının kesme derinliğini etkileyen en önemli faktörler olduğunu belirlemiştir.

Tosun vd. (2013), ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirlemişlerdir (iş parçası: 6061-T6 ve 7075-T6 alüminyum alaşımları). Araştırmacılar, su basıncındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü artırdığını tespit etmişlerdir. Çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün kesme derinliğindeki artışla birlikte arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Aydın vd. (2013b), kesme derinliği üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu belirlemişlerdir (iş parçası: granit). Çalışmada, nozul-iş parçası mesafesinin artmasıyla kesme derinliği azalmıştır. Kesme derinliği ve yüzey kalitesi üzerinde aşındırıcı besleme miktarının da önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.

Gupta vd. (2013), ilerleme hızının artması ile kerf açısının azaldığını tespit etmişlerdir (iş parçası: Makrana beyaz mermer). Araştırmacılar, ilerleme hızının azalması ile kesme zamanının arttığını vurgulamışlardır.

Oh & Cho (2014), düşük dayanımlı iş parçalarında (13 farklı doğal taş) yüksek kesme derinliklerinin elde edildiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ASJ tarafından oluşturulan

erozyonlara karşı bir direnç indeksi olarak tek eksenli basma dayanımının kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Aydın (2014), ASJ ile doğal taş kesiminde kullanılan aşındırıcı partiküllerin dikkate değer bir miktarının kesim sonrasında tekrar kullanılabilir bir formda olduğunu göstermiştir (iş parçası: granit). Çalışmada, sertlik aşındırıcıların tekrar kullanılabilirliğini etkileyen en önemli doğal taş özelliği olarak belirlenmiştir. Ayrıca, aşındırıcıların tekrar kullanılabilirliklerinin doğal taşın mikro setliğine, kuvars ve plajiyoklaz içeriğine bağlı olarak yüksek güvenirlilikte tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Karakurt vd. (2014), ASJ ile doğal taş kesmede, kerf genişliği ile su emme kapasitesi, birim ağırlık, sertlik, minerallerin maksimum tane boyutu ve doğal taşın ortalama tane boyutu arasında önemli korelasyonlar elde etmişlerdir (iş parçası: 9 farklı granit).

Aydın (2015), ASJ ile doğal taş kesmede aşındırıcıların tekrar kullanılabilirlik oranlarını ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü kesimler için sırasıyla %82, %58, %34 ve %18 olarak belirlemiştir (iş parçası: Giresun Vizon). Çalışmada, kesme derinliği, kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğünün geri kazanımla birlikte azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmacı, kerf açısı ve geri kazanım arasında etkin bir trend gözlememiştir. Çalışmada, aşındırıcı partiküllerin tane boyut dağılımının geri kazanılan aşındırıcıların kesme performansının iyileştirilmesinde önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Arab & Celestino (2017), iş parçasının (siyenit, granit, mermer ve kumtaşı) mineralojik bileşiminin ve fiziko-mekanik özelliklerinin kerf profili üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Alsoufi vd. (2017), ASJ parametrelerinin iş parçasının (Carrara mermer) yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, ilerleme hızı ile iş parçasının yüzey kalitesinin ters ilişkili olduğunun sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmacılar, aşındırıcı besleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde baskın bir kesme parametresi olmadığını (çalışılan aşındırıcı besleme miktarı seviyeleri için) belirlemişlerdir. Çalışmada, jetin iş parçası ile temas ettiği ilk zamanlarda (kesme başlangıcı) iş parçasının ilgili bölümlerinde daha pürüzsüz kesme yüzeyleri elde edilmiştir. Bunun yanında, nozul-iş parçası mesafesindeki artış sonucunda yüzey kalitesinin azaldığı tespit edilmiştir.

Aydın vd. (2019a) ASJ ile doğal taş kesiminde farklı aşındırıcıların (garnet, beyaz alümina, kahverengi alümina, silisyum karbür, cam küre ve zımpara tozu) kullanımını

denemişlerdir. Çalışmada, aşındırıcı olarak silisyum karbür ve alüminanın kullanıldığı kesimlerde kesme derinliği ve kerf açısı yönünden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Aydın vd. (2019b) granit atıklarının aşındırıcı olarak kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, granit atıklarının aşındırıcı olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Xiao vd. (2021), ilerleme hızını şeyl, kömür ve kumtaşı gibi tortul doğal taşların yüzey kalitesini etkileyen önemli kesme parametresi olarak tanımlamışlardır.

Kaya vd. (2022), doğal taşların kesilmesinde (10 farklı doğal taş) garnet yerine kullanılabilecek farklı aşındırıcıların (beyaz ve kahve alüminyum oksit, cam küre, zımpara tozu, olivin, çelik bilye ve plastik granül) kesme performanslarını araştırmışlardır. Çalışmada, genel olarak çelik bilye ve alüminyum oksitlerin iyi performansı gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, plastik granül zayıf kesme performansına sahip aşındırıcı olarak kaydedilmiştir. Kesme performansını etkileyen en önemli doğal taş özelliklerinin yoğunluk ve Böhme aşınma kaybı olduğu belirlenmiştir. Geliştirilen modeller sayesinde performans çıktılarının etkin bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna varılmıştır. Arzu edilen özelliklere göre aşındırıcıların garnet alternatifi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Aydın vd. (2022) ASJ ile doğal taş kesmede (iş parçası: doğal taş) tek ve çift geçişli kesme yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, performans kriterleri olarak kesme-aşınma bölgesi derinliği ve yüzey pürüzlülüğü referans alınmıştır. İki geçişli kesmenin, tek geçişli kesmeye göre daha yüksek derinlikler sunduğu görülmüştür. Aynı zamanda yüzey kalitesinin iki geçişli kesme ile iyileştirildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Kaya vd. (2023), aşındırıcı ve doğal taş özelliklerinin ASJ'nin kesme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, çeşitli aşındırıcılar (garnet, beyaz ve kahve alüminyum oksit, cam küre, zımpara tozu, olivin, çelik bilye ve plastik granül) kullanılarak, çeşitli iş parçalarının (doğal taşlar) kesimi gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı performansının değerlendirilmesinde kesme derinliği dikkate alınmıştır. Garnet, çelik bilye, beyaz ve kahverengi alüminyum oksitin daha yüksek kesme derinlikleri sunduğu tespit edilmiştir. Bunlara kıyasla, olivin, zımpara tozu ve cam küre ile daha sık kesiklerin elde edildiği görülmüştür. Plastik granüllerin ise etkili bir kesme gerçekleştirmediği belirlenmiştir.

1.5. Tez Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

ASJ ile kesme çalışmalarında aşındırıcı olarak genellikle garnet kullanılmıştır. Garnete alternatif olarak kullanılabilecek aşındırıcıları ele alan sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda da genellikle ticari aşındırıcılar kullanılmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada çeşitli atıkların (granit, cam, beton ve ferrokrom cüruf) aşındırıcı olarak kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

İlgili atıklar çeşitli sektörlerde yürütülen faaliyetler sonucunda iri ve ince boyutlarda açığa çıkabilmektedir. İri boyutlu atıklar çeşitli boyut küçültme-sınıflandırma işlemleri sonucunda çalışma gereksinimlerine uygun boyutlara getirilebilmektedir. Diğer taraftan, ince boyutlu atıklar basit bir eleme işlemi ile aşındırıcı olarak değerlendirilebilmektedir (uygun sertlik, yoğunluk vd. özelliklere sahipse). Bu kapsamda değerlendirildiğinde, ilgili atıkların aşındırıcı olarak değerlendirilmesi ile kesme maliyetlerinin azalacağını söylemek mümkündür. Atık kaynaklı aşındırıcıların hazırlanmasında ana maliyet kalemlerini öğütme ve eleminin oluşturacağı söylenebilir. Bu durum, atık kaynaklı aşındırıcının birim maliyetinin düşük olmasına imkân sağlayacaktır. Bilindiği gibi aşındırıcı maliyeti ASJ ile kesme maliyetlerinin yaklaşık %75'ini oluşturmaktadır (Babu & Chetty, 2003). Atık kaynaklı malzemelerin aşındırıcı olarak değerlendirmesi ile bu oranın düşürülebilmesi mümkün olacaktır. Tablo 1'de ilgili atıkların oluşum süreçlerinden bahsedilmiş ve miktarlarına yönelik çeşitli bilgiler sunulmuştur.

İlgili atıkların ASJ kesme uygulamalarında kullanımıyla çevrenin ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanacaktır. Ayrıca, kullanılmayan atıklar ekonomiye kazandırılabilir. Bunun yanında, ASJ kesme uygulamalarında maliyet kaleminin önemli bir bölümünü oluşturan aşındırıcı maliyetleri azalacaktır. Bu ise kesilen malzemenin üretim maliyetini etkileyerek rekabet gücünü arttırabilecektir.

Bu çalışmanın amacı, ASJ ile doğal taş kesmede aşındırıcı olarak kullanılacak granit, cam, beton ve ferrokrom cüruf atıklarının kesme performanslarının belirlenmesidir. Bu amaç temelinde hedefler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Atıklarının çeşitli özelliklerinin (sertlik, yoğunluk ve şekilsel özellikler) kesme performansı üzerindeki etkileri saptanacaktır.
- ii. Kesme hızının farklı atıklar temelinde kesme performansı üzerindeki etkisi irdelenecektir.

- iii. Farklı performans göstergeleri açısından daha iyi performans sunan atık çeşidi belirlenecektir.
- iv. Kesme yüzeylerinde gözlenen makro ve mikro ölçekli aşınmaların atık çeşidiyle olan ilişkileri saptanacaktır.

Tablo 1. Atıkların oluşum süreçleri ve miktarları

Atık	Süreç	Sayısal Değerlendirme
Granit	- Doğal taş ocaklarındaki üretim - Doğal taş işleme tesislerindeki boyut küçültme faaliyetleri	Ocaklarda ve fabrikalarda yürütülen kesme faaliyetlerine bağlı olarak üretimin %40-70'i oranında doğal taş atığı ortaya çıkmaktadır. İri boyutlu atıklar, ocaktaki üretimin yaklaşık %40'ını oluştururlar. İnce boyutlu toz atıkları ise fabrikalarda işlenen doğal taşların yaklaşık %30'una denk gelmektedir (Aydın & Karakurt, 2020).
Cam	- İçecek şişeleri - Pencere ve araba camı atıkları	Dünyada yıllık olarak ~ 200 milyon ton katı atık oluşmaktadır. Camlar, bu atıkların %7'sini meydana getirmektedir. Türkiye'de 120000 ton/yıl civarında cam atığı üretildiği tahmin edilmektedir. Bu miktarın 80000 tonu geri dönüştürülmektedir (Topçu & Canbaz, 2004).
Beton	- Kentsel dönüşüm - Binaların yıkılması	Küresel bazda, inşaat yıkım atıkları, kentsel katı atıkların ~ %30'unu oluşturmaktadır. İnşaat yıkım atıklarının ise %75'ini beton atıklarının oluşturduğu tahmin edilmektedir (Demir, 2009; EPA, 2019).
Ferrokrom Cürufu	Ferrokrom üretimi	1 ton ferrokromun üretiminde ~ 1,5 ton ferrokrom cürufu açığa çıkmaktadır (Çobanoğlu, 2004). Türkiye'deki ferrokrom tesislerinde 100000-150000 ton/yıl civarında cürufun ortaya çıktığı tahmin edilmektedir (Erdoğan, 2011).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Deney Malzemesi ve Karakterizasyonu

2.1.1. İş Parçalarının Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda kullanılan iş parçaları piyasada yaygın olarak tercih edilen doğal taşlardan elde edilmiştir. Çalışma kapsamında farklı dayanım ve sertliğe sahip 3 çeşit doğal taş (Vitrik Litik Tüf, Lamprofir ve Kristal Vitrik Tüf) üzerinde karakterizasyon çalışmaları yürütülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. Kullanılan doğal taşlar: a) Vitrik Litik Tüf, b) Lamprofir ve c) Kristal Vitrik Tüf

Doğal taşların mineralojik yapısına yönelik değerlendirmeler MTA laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir (Tablo 2-4).

Tablo 2. Doğal taşların renk, doku ve tane büyüklükleri

Doğal Taş	Renk	Doku (Makro)	Tane Büyüklüğü	Doku (Mikro)
Kristal Vitrik Tüf	Sarımsı gri	Taneli	İnce-Orta	Kırıntılı
Vitrik Litik Tüf	Esmer kırmızı	Taneli	İnce-Orta	Kırıntılı
Lamprofir	Yeşil gri	Porfirik*	İnce-Orta	Porfirik*

* Kayaçta bulunan minerallerin bir bölümünün diğer minerallere göre çok daha iri gözlemlendiği durumlarda kullanılan doku tanımlamasıdır (Gökçe, 2000).

Tablo 3. Doğal taşların mineralojik bileşimleri

Doğal Taş	Bileşenler-Açıklama
Kristal Vitrik Tüf	Yoğun volkan camı kıymıkları/parçaları (küçük-orta tane boyutlarında), az oranda pomza parçaları, mineral parçaları (plajiyoklaz, sanidin, biyotit), matriks (camsı malzeme)
Vitrik Litik Tüf	Yoğun volkan camı kıymıkları/parçaları (düşük-orta taneli), mineral parçaları (plajiyoklaz, sanidin, piroksen, opak), çok az oranda doğal taş (damar) parçaları
Lamprofir	Ana bileşenler: plajiyoklaz (orta taneli, yarı öz şekilli, homojen dağılımlı), biyotit (orta taneli, homojen dağılımlı), apatit (orta taneli, homojen dağılımlı), alkali feldspat (orta taneli, heterojen dağılımlı), karbonatlaşmış mineral psödömorfu (orta taneli, heterojen dağılımlı) Tali bileşenler: Opak mineral (ince-orta taneli, homojen dağılımlı), hamur: altere

- Doğal taşların mineralojilerine yönelik bazı değerlendirmeler sunulmaktadır:
- Kristal Vitrik Tüf: Matriks kısmında yer yer yaygın kızılımsı kahve renkli opak boyamalar izlenmektedir. Gerek volkan camı parçalarında gerek minerallerde yer yer belirgin bir yönlenme izlenmektedir.

- iii. Vitrik Litik Tüf: Piroksen mineraller parçalarının kenarları boyunca değişen oranlarda opaklaşma izlenmektedir. Matriks kısmında yaygın (genelde opak ve piroksen mineral parçalarının etraflarında) değişen oranlarda kızılımsı kahve renkli opak boyamalar izlenmektedir. Damar kaya parçaları; plajiyoklaz minerallerinden oluşmuş hamur içinde plajiyoklaz ve piroksen fenokristallerinin izlendiği olası gabroik bileşimli damar doğal taş parçalarından oluşmaktadır. Gerek volkan cami parçalarında gerek minerallerde belirgin bir yönlenme izlenmektedir.
- iv. Lamprofir: Doğal taş alterasyon nedeniyle ilksel mineralojisini kaybetmiştir. Hamurda yoğun analsimleşme izlenmektedir. Yapılan XRD analizinin sonucuna göre doğal taş: analsim, piroksen, biyotit, apatit, alkali feldspat, mika grubu mineraller, kil grubu mineraller ve zeolitten oluşmaktadır. Yoğun analsim dönüşümleri, karbonatlaşma, killeşme, zeolitleşme izlenen örnekte bulunan kristaller kırık ve çatlaklıdır. Doğal taşın gerek dokusu gerekse mineral çeşitliği nedeniyle lamprofir olabileceği düşünülmektedir.

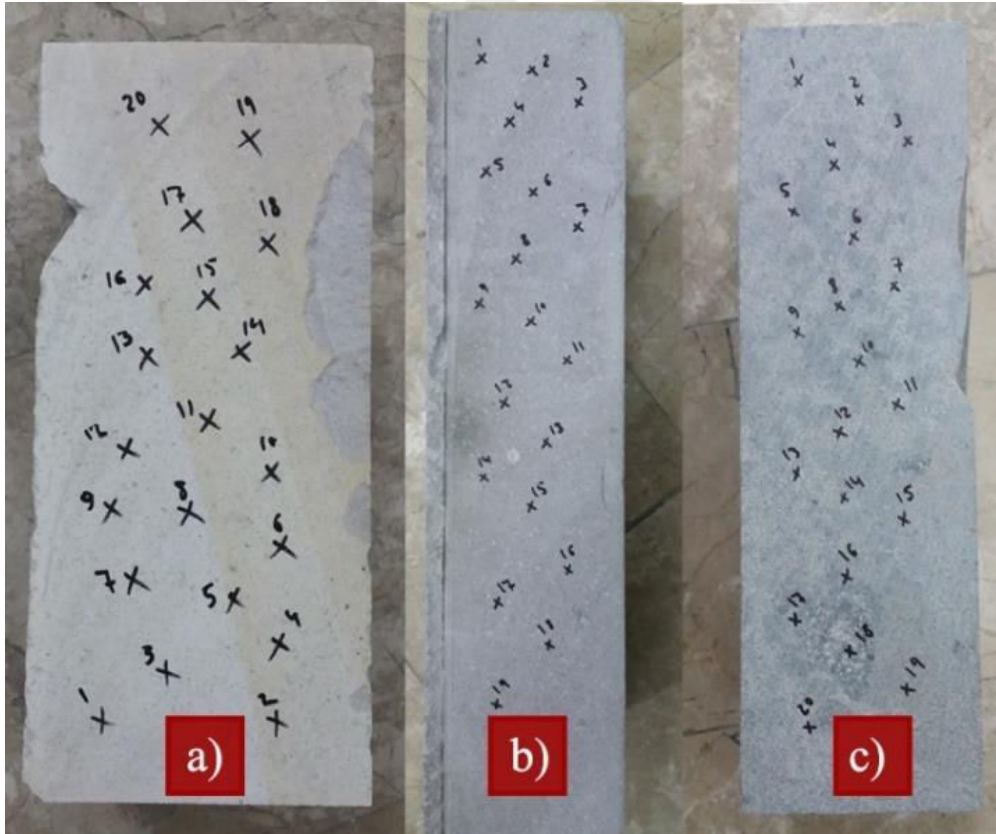
Tablo 4. Doğal taşların kimyasal içerikleri (%)

Bileşenler	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Kızdırma Kaybı	7,45	0,40	7,50
SiO ₂	70,10	71,10	38,70
Al ₂ O ₃	12,30	14,00	14,00
Fe ₂ O ₃	1,20	2,60	9,70
CaO	3,10	1,30	16,00
MgO	0,80	0,50	4,60
Na ₂ O	0,60	4,10	3,60
K ₂ O	3,80	4,80	2,60
P ₂ O ₅	<0,1	0,10	1,30
MnO	<0,1	0,10	0,20
TiO ₂	0,20	0,50	1,10

Doğal taşların Schmidt sertliklerinin belirlenmesi için L dijital Schmidt çekici kullanılmıştır (Şekil 6). Schmidt çekici ile yük uygulanacak doğal taşların yüzeyleri zımparalanıp temizlenmiştir. Her bir doğal taş bloğu üzerinde 20 uygulama noktası belirlenmiştir (Şekil 7). Doğal taş blok yatay bir yüzey üzerine yerleştirilmiştir. Uygulama noktaları, aralarındaki mesafe en az 2 cm olacak şekilde konumlandırılmıştır. Testlerin sonuçları Tablo 5’te gösterilmektedir.



Şekil 6. Dijital schmidt çekici tip L

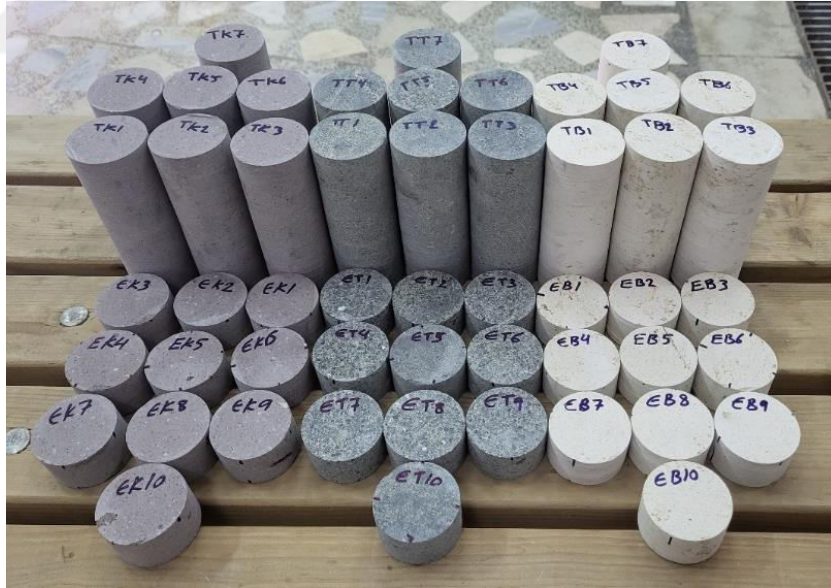


Şekil 7. Schmidt deneyi için hazırlanmış bloklar, a) Kristal Vitrik Tuf, b) Vitrik Litik Tuf, c) Lamprofir

Tablo 5. Schmidt çekici deneyinin sonuçları

Doğal Taşlar	Değerler
Kristal Vitrik Tüf	59,00
Vitrik Litik Tüf	78,75
Lamprofir	79,50

Kesme parametrelerinin belirlenmesinde etkili olabilecek bir diğer faktör de doğal taşların fiziksel ve mekanik özellikleridir. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için disk numuneler kullanılmış, caliper tekniği ile ISRM standardı referans alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Deneylerde kullanılan diskler ve karotlar K.T.Ü Maden Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında hazırlanmıştır. Karotlar, sulu kesim yapan karot alma makinesi ile NX karotiye (çapı 54,7 mm) kullanılarak hazırlanmıştır. Karotların düzeltilmesi için karot kesme testeresi kullanılmıştır ve ihtiyaçlar dahilinde disk örnekler hazırlanmıştır (Şekil 9). Hazırlanan örnekler oda sıcaklığında 2 hafta süreyle bekletilmiştir.



Şekil 8. Disk ve karot örnekleri



Şekil 9. a) Karot alma makinesi ve b) karot kesme testeresi

Doğal taşların fiziksel özelliklerini (su emme oranı, boşluk oranı, tabii yoğunluk vb.) belirlemek için disklerin boyutları kumpasla yardımıyla ölçülmüştür (0,1 mm hassasiyetle). Elde edilen veriler kullanılarak numunelerin hacimleri hesaplanmıştır. Sonrasında ise numuneler tartılmış ve doğal ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler 24 saat süreyle 105°C’da fırında kurutulmuş ve tekrar tartılmıştır. Numuneler, su içinde 48 saat bekletilmiştir. Sudan alınan numuneler üzerindeki fazla su kâğıt havlu ile alınmış ve 3. tartım gerçekleştirilmiştir. Ede edilen veriler kullanılarak doğal taşların fiziksel özellikleri belirlenmiştir (Tablo 6).

Tablo 6. Doğal taşların fiziksel özellikleri

Fiziksek Özellik	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Ağırlıkça su emme kapasitesi (%)	12,27	6,07	2,88
Efektif su emme (%)	7,67	5,46	1,24
Doğal su içeriği (%)	3,66	0,28	1,60
Doyma derecesi (%)	29,80	4,57	55,62
Tabii yoğunluk (gr/cm ³)	1,69	2,00	2,47
Mineral tane yoğunluğu (gr/cm ³)	2,04	2,27	2,61
Efektif porozite (%)	20,00	12,09	7,00
Boşluk oranı (%)	24,99	13,76	7,53

Doğal taşların mekanik özelliklerinden olan Tek Eksenli Basma Dayanımı, Çekme Dayanımı, Nokta Yük Dayanımı, Aşınma Kaybı ve Ultrasonik Dalga Hızı çalışma kapsamında belirlenmiştir. Tek Eksenli Basma Dayanımı ve Endirekt Çekme Dayanımı deneyleri K.T.Ü Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. a) Tek Eksenli Basma Dayanımı ve b) Endirekt Çekme Dayanımı deneylerinin uygulanması

Böhme Aşınma Kaybı deneyini gerçekleştirmek için Böhme test makinesi kullanılmıştır. Her bir doğal taştan birer adet 71 mm'lik küp numune hazırlanmıştır. Numuneler etüvde kurulduktan sonra hassas bir teraziyle tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Deney için aşındırıcı madde olarak zımpara tozu seçilmiştir. Numuneler cihaz üzerinde konulup aşındırıcılar cihazın üzerine dökülmüştür. Numune yüzeyine sürtünme kuvveti uygulayarak aşınma meydana getirilmiştir. Cihazın çalıştırılmasından sonra dönme sayıları kaydedilmiştir. Her 22 devirden sonra numune bulunduğu yüzey üzerinde 90 derece döndürülmüştür. Böylelikle, numunenin ilgili yüzeyinin etkin bir şekilde sürtünmeye maruz kalması sağlanmıştır. Bu işlem 16 defa tekrarlanmıştır. Deney

tamamlandığında, numune tekrar tartılıp aşınma işleminden oluşan ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Elde edilen ağırlık kaybı, numunenin başlangıç ağırlığına çıkarılmış ve numunenin yoğunluğu kullanılarak hacim kaybı hesaplanmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. Böhme Aşınma Kaybı deneyi uygulaması

Ultrasonik hızın belirlenmesinde Ultrasonik P-Dalga Hızı cihazı kullanılmıştır (Şekil 12). Deneyde, her bir doğal taş için birer adet karot numunesi kullanılmıştır. Karotların alt ve üst yüzeyleri zımparalanıp, birbirlerine paralel olması sağlanmıştır. Uzunlukları kaydedilmiş karot numunelerin alt ve üst yüzeyine jeofonlar konulup cihazda gösterilen zaman (μsn) kaydedilmiştir. Eşitlik (3) kullanılarak her bir doğal taşın ultrasonik dalga hızı elde edilmiştir:

$$V_p = S/t \text{ (m/sn)} \quad (3)$$

Burada:

V_p : Ultrasonik dalga hızı (m/sn),

S : Numunenin uzunluğu (boyu) (m),

t : Ultrasonik dalganın bir yüzeyden diğerine ulaşana kadar geçen zaman (sn) dır.

Her bir deney sonucunda elde edilen veriler kaydedilmiştir. Tablo 7’de mekanik deneylerin sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 12. Ultrasonik P-dalga hızı cihazı

Tablo 7. Doğal taşların mekanik özellikleri

Özellik	Kristal- Vitrik Tüf	Vitrik-Litik Tüf	Lamprofir
Tek Eksenli basma dayanımı (MPa)	44,07	96,07	100,38
Çekme dayanımı (MPa)	3,84	5,18	7,42
Nokta yük dayanım indeksi (MPa)	2,54	3,71	7,66
Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	26,15	24,05	9,15
Ultrasonik dalga hızı (m/sn)	2677	2360	4971

Deney programı doğrultusunda, her bir doğal taştan 15 iş parçasına ($5 \times 18,5 \times 10 \text{ cm}$) ihtiyaç duyulmaktadır. Kesim esnasında makine hatası ve beklenmeyen hatalar yüzünden her bir doğal taştan 3 adet yedek iş parçası hazırlanmıştır. İş parçaları, KTÜ Maden

Mühendisliği Bölümünde doğal taş kesme makinesi kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 13). Kesme işlemi iş parçasının uzun kenarı boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 13. Diskli doğal taş kesme makinesi

Hazırlanan iş parçaları, kesme işlemi esnasında emilen suların gidermesi için iki gün 60° sıcaklığındaki bir etüvde bekletilmişlerdir (ASTM C880, 2016). Kurutulan iş parçaları tartılarak elde edilen değerler kaydedilmiştir (Şekil 14).



Şekil 14. Kesme deneylerinde kullanılan iş parçaları

2.1.2. Aşındırıcıların Hazırlanması

Çalışma kapsamında granit, beton, cam ve ferrokrom cüruf atıkları çeşitli işlemlerden geçirilerek aşındırıcı olarak kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 15). Tablo 8’de atıklara yönelik bazı bilgiler sunulmaktadır.

Tablo 8. Kullanılan atık aşındırıcılara yönelik bazı bilgiler

Atık çeşidi	Açıklama
Granit	Laboratuarda yürütülen çeşitli çalışmalardan arta kalan (Rosa Minho, Bergama Grey ve Balaban Green isimli granitler) doğal taşlarından hazırlanmıştır.
Beton	Eski bir binaların yıkımı sonucunda açığa çıkan malzemelerden elde edilmiştir.
Cam	Atık camlardan (pencere camı, otomobil camı ve içecek şişeleri) hazırlanmıştır.
Ferrokrom cürufu	Atık olarak açık havada depolanan Antalya’daki bir tesisten (ETİ Elektrometalurji A. Ş.) alınmıştır.



Şekil 15. a) Granit kırıntıları, b) beton atığı ve c) cam atığı (Ferrokrom cürufu toz olarak temin edilmiştir. Sadece elemeye tabi tutulmuştur.)

Aşındırıcı malzemeleri hazırlamak için atıklar boyut küçültme işlemine tabi tutulmuştur. Her bir atık malzeme 10-15 cm’lik parçalara ayrıldıktan sonra çeneli kırıcı makinesine beslenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Çeneli kırıcı makinesi

Çeneli kırıcı makinesinden elde edilen malzeme (20 mm'nin altında) ise öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada çubuklu değirmen kullanılarak öğütme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. a) Öğütme makinesi ve b) değirmen çubukları

Her aşındırıcı malzemesi ayrı ayrı değirmene atılmış ve toz haline getirilene kadar öğütülmüştür. Öğütülmüş malzemeler otomatik elek makinesi kullanılarak sınıflandırılmıştır. Otomatik elek makinesine iki adet elek ($125\ \mu\text{m}$ ve $250\ \mu\text{m}$) konulmuştur. Eleklerin arasında kalan malzemeler sonraki işlemler için paketlenmiştir. $250\ \mu\text{m}$ 'den daha büyük malzemeler yeniden öğütülmüştür. $125\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük malzemeler ise farklı çalışmalarda değerlendirilmek üzere paketlenmiştir (Şekil 18). Aşındırıcı hazırlama prosedürü gösterilmektedir.



Şekil 18. Otomatik elek makinesi

Elekten çıkan aşındırıcılar yıkanmış ve 24 saat 105°C 'ta fırında kurulmuştur. Kurutulan aşındırıcılar kapalı kaplara konulmuş ve kesme işleminin gerçekleştirileceği fabrikaya nakil edilmiştir (Şekil 19).



Şekil 19. Kesime hazır olan aşındırıcılar: a) Cam, b) Granit, c) Beton ve d) Ferrokrom Cürufu

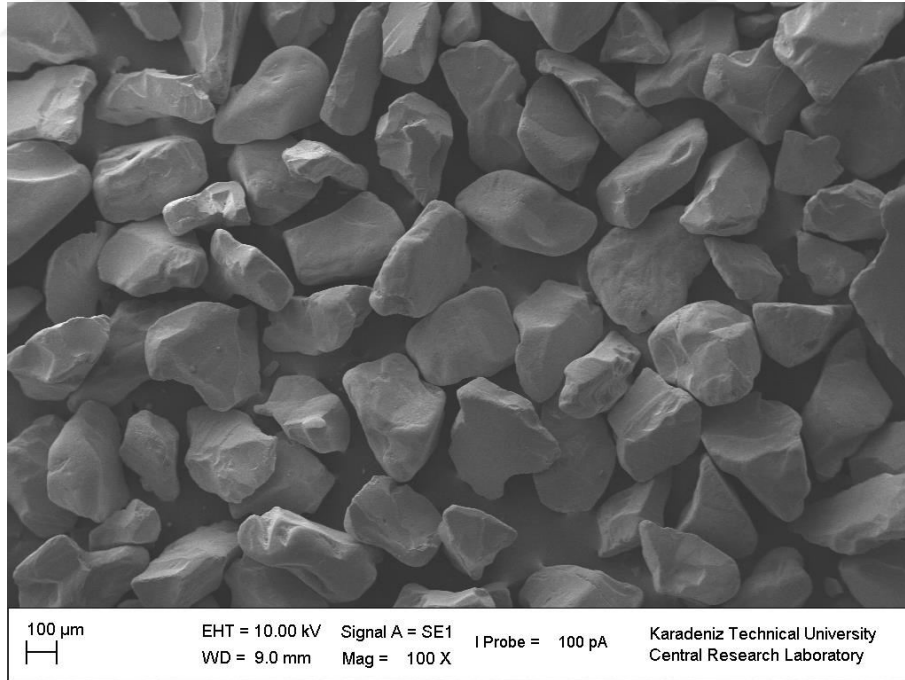
2.1.3. Aşındırıcıların Karakterizasyonu

Aşındırıcıların kimyasal analizleri MTA laboratuvarlarında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 9’da sunulmuştur.

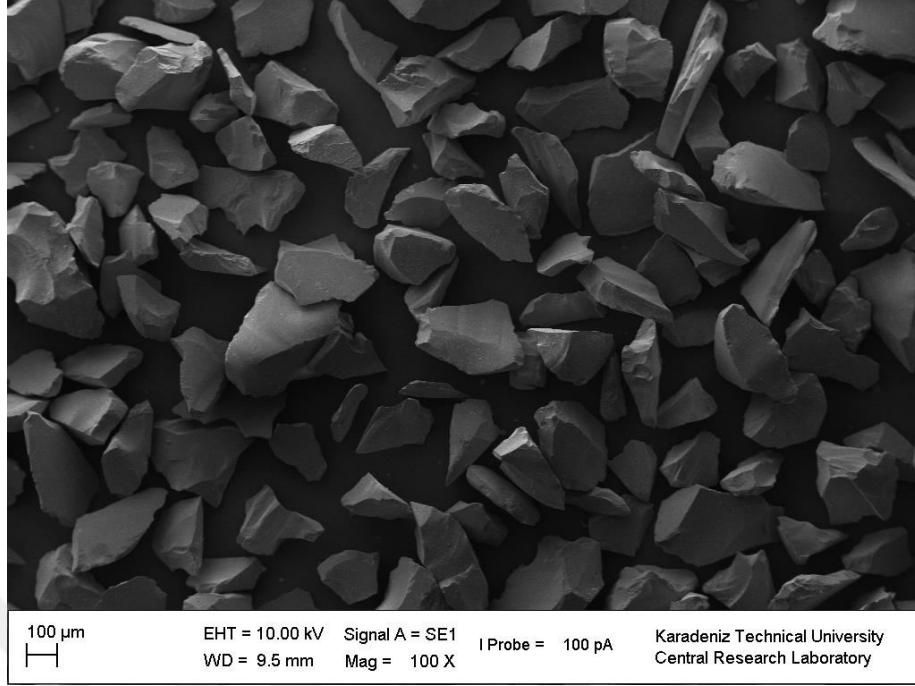
Tablo 9. Aşındırıcıların kimyasal içerikleri (%)

Aşındırıcı	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Diğer
Garnet	23,00	35,00	1,00	7,00	33,00	MnO: 1,00
Cam	1,55	70,34	9,33	4,02	0,31	Na ₂ O:14,45
Granit	16,50	67,44	2,37	1,26	2,88	K ₂ O-Na ₂ O: 9,55
Beton	13,85	52,30	11,45	3,18	5,72	K ₂ O-Na ₂ O-Diğer: 13,5
Ferrokrom C.	8,66	31,44	45,48	12,78	1,02	Cr ₂ O ₃ : 0,52

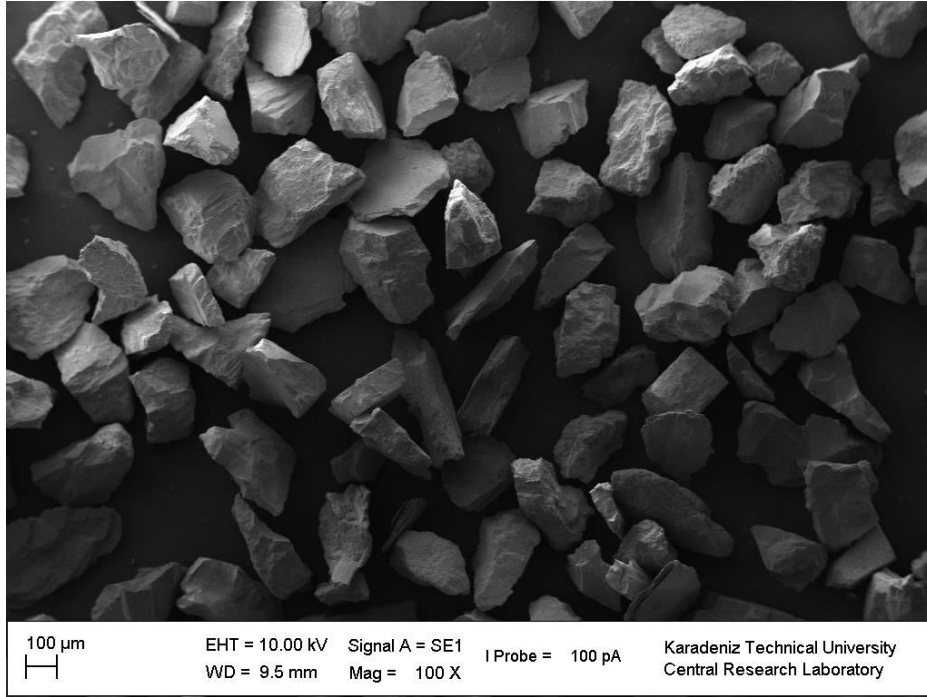
Aşındırıcıların tane şekilleri, K.T.Ü Merkezi Araştırma Laboratuvarı’nda bulunan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir (Şekil 20-24).



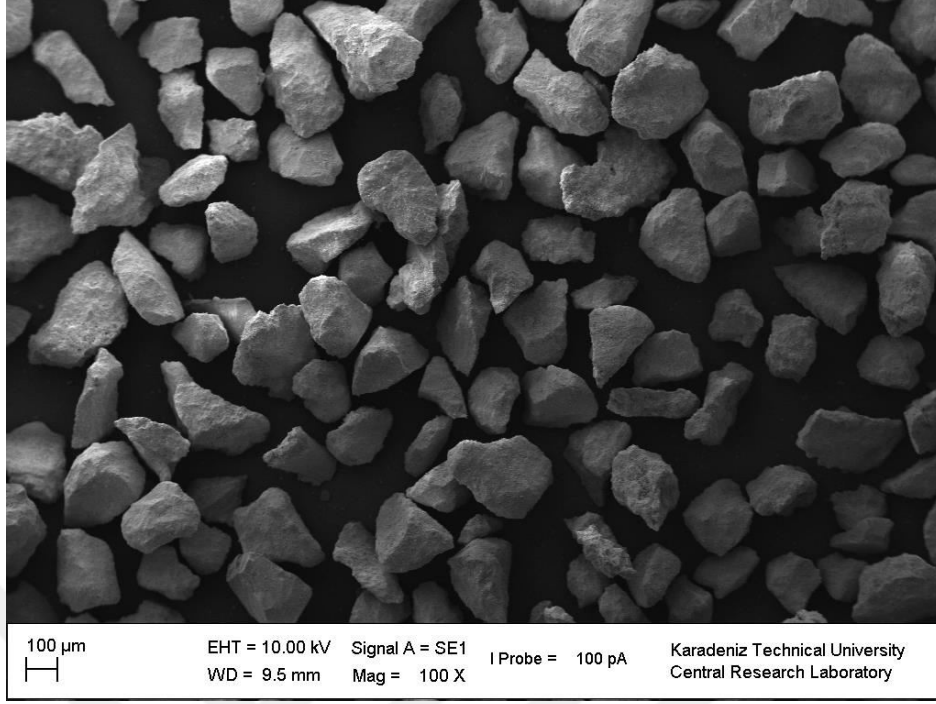
Şekil 20. Garnet aşındırıcının SEM görüntüsü



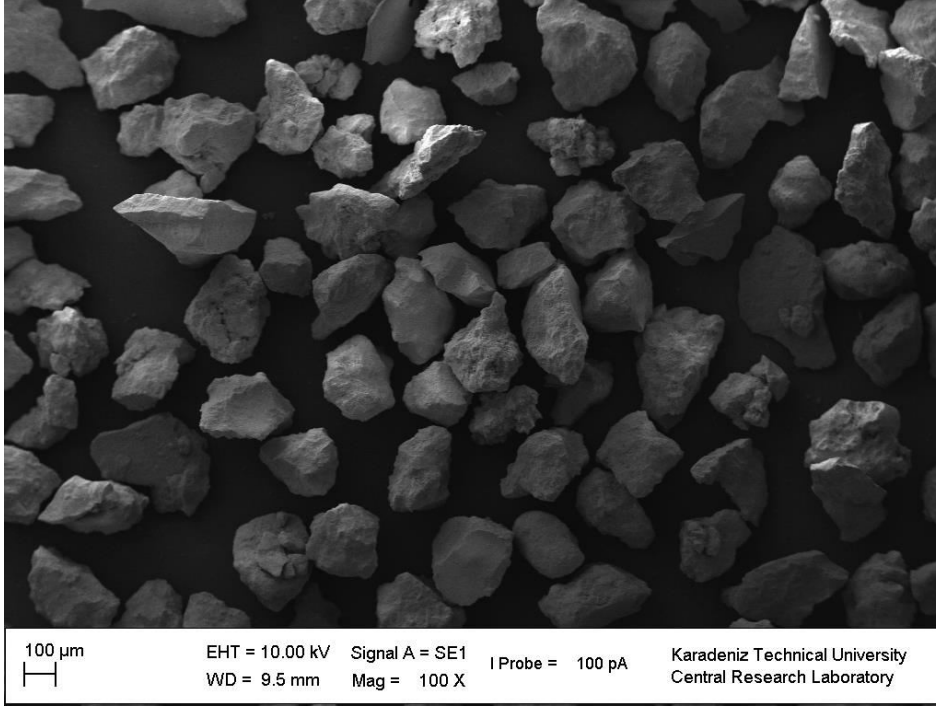
Şekil 21. Cam aşındırıcının SEM görüntüsü



Şekil 22. Granit aşındırıcının SEM görüntüsü



Şekil 23. Beton aşındırıcının SEM görüntüsü



Şekil 24. Ferrokrom cürufu aşındırıcının SEM görüntüsü

Anlaşılabacağı gibi, garnet, beton ve ferrokrom cürufu benzer tane şekillerine (çok keskin olmayan-hafif yuvarlak köşeler) sahiptirler. Ferrokrom cürufu ve betona ait tanelerin yüzeylerinin garnetten daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Cam taneleri ise daha keskin tanelerden oluşmaktadır. Farklı minerallerden oluşan granit aşındırıcısı ise keskin köşeli, küreselliği farklı derecelerde tanelere sahiptir.

Aşındırıcıların fiziksel özellikleri Tablo 10'da gösterilmektedir. Aşındırıcıların mineral tane yoğunlukları, K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında, Piknometre deneyi (ASTM D854-14 standardı) ile belirlenmiştir (Şekil 25). Aşındırıcıların sertlikleri ise farklı kaynaklardan elde edilmiştir (Kaya, 2022; Murphy, 2001; URL-4; URL-5).

Tablo 10. Aşındırıcıların fiziksel özellikleri

Aşındırıcı Adı	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertliği (~ Mohs)	Renk	Tane Şekli
Garnet	4,03	7,5	Bordo/kahverengi	Köşeli
Ferrokrom cürufu	3,08	6	Gri	Köşeli
Granit	2,65	6,5	Siyah, Beyaz, Koy. Kır.	Köşeli
Cam	2,50	5,5	Beyaz-Yeşil	Köşeli
Beton	2,44	5	Açık Gri	Köşeli



Şekil 25. Piknometre deneyi

2.2. Deney Tasarımı ve Düzenegi

Kesme deneylerinde, ilerleme hızı haricindeki tüm kesme parametreleri sabit tutulmuştur. İş parçaları üzerinde gerçekleştirilen ön deneyler sonucunda ilerleme hızının 500-600 mm/dk aralığında seçilebileceği belirlenmiştir. Tablo 11’de kesme parametrelerinin değerleri gösterilmektedir.

Tablo 11. Kesme deneylerinin gerçekleştirildiği çalışma koşulları

Değişkenler	Değerler
İlerleme Hızı (mm/dk)	500, 550, 600
Aşındırıcı Türü	Garnet, Cam, Ferrochrom Cürufu, Granit, Beton
Doğal Taş Türü	Kristal Vitrik Tüf, Vitrik Litik Tüf, Lamprofir
Aşındırıcı Besleme Miktarı (gr/dk)	400
Nozul-Örnek Mesafesi (mm)	5
Su Jeti Çalışma Basıncı (MPa)	320
Aşındırıcı Boyutu (mesh)	60-120

Tablo 11’deki değişkenler referans alınarak toplamda 45 kesme deneyi (ön deneyler hariç) gerçekleştirilmiştir. Kesme deneyleri, İstanbul’da faaliyet gösteren özel bir şirkette gerçekleştirilmiştir (Şekil 26).



Şekil 26. Kesme deneylerinde kullanılan ASJ

Bilgisayar kontrollü ASJ kullanılarak iş parçaları uzunlukları boyunca kesilmiştir (Şekil 27). Tablo 12’de kesme deneylerinde kullanılan ASJ’nin özellikleri verilmektedir.

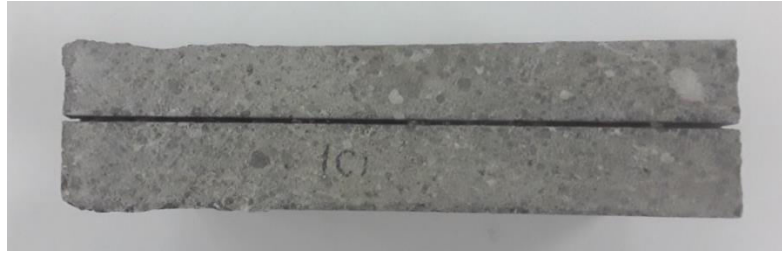
Tablo 12. Kesme deneylerinde kullanılan ASJ’nin özellikleri

Makine Tipi	SL-V 50 HP (KMT)
Enerji Tüketimi (kwh)	40
Aşındırıcı Tüketimi (gr/dk)	100-400
Nozul Çapı (mm)	1,1
Nozul Uzunluğu (mm)	75
Su Tüketimi (lt/dk)	3,8



Şekil 27. Kesime hazır iş parçası

Kesme işlemi tamamlandıktan sonra iş parçaları KTÜ Maden Mühendisliği Laboratuvarına getirilmiştir. İş parçaları açık havada 2 hafta için kurutulmuştur (Şekil 28).



Şekil 28. ASJ ile kesilmiş bir iş parçası

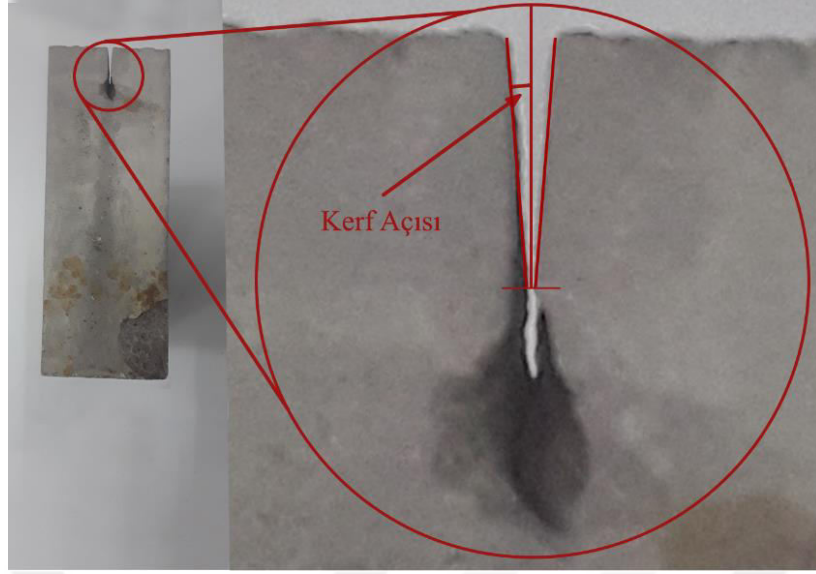
2.3. Kesme Sonrası Örneklerin Kesme Geometrilerinin Analizi

İş parçalarında meydana gelen ağırlık kayıplarının belirlenmesi için tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Tartımdan önce iş parçasının kesme yüzeyleri hava pompası ile temizlenmiştir (yüzeylerdeki aşındırıcıların uzaklaştırılması için). Sonrasında ise, iş parçalarında elde edilen kesme genişliği, kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü, kesme-aşınma derinliği ve kerf açısı ölçülmüştür. Kesme genişliğinin ölçülmesi için dijital kumpas kullanılmıştır (Şekil 29). Kesme hattı boyunca 2 cm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Her bir kesim için iş parçası üzerinde 8 adet ölçüm alınmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması kesme genişliği olarak kaydedilmiştir.



Şekil 29. Kesme genişliğinin ölçümü

İş parçalarının yan profili üzerinden kerf verileri elde edilmiştir (Şekil 30). Kesme yarığı üzerinde, dijital kumpas kullanılarak kesme derinliği, yarığın üst ve alt genişliği ölçülmüştür. Ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak kerf açıları hesaplanmıştır (Şekil 30).



Şekil 30. Kerf açısı

Kesme ve kesme-aşınma bölgesi derinliğinin ölçülmesi için, iş parçalarının açılması gerekmektedir. Her bir iş parçası kesme hattı boyunca ikiye bölünmüştür. Kesme derinliğinin yüksek olduğu iş parçalarında bu işlem hafif bir darbenin etkisiyle gerçekleştirilmiştir. Kesme derinliğinin az olduğu iş parçalarında diskli kesici kullanılmıştır. Bu aşamada, kesme hatlarının çakışmamasına ve kesme yüzeylerinin tahrip edilmemesinde özen gösterilmiştir (Şekil 31).



Şekil 31. Diskli kesici kullanılarak iş parçalarının kesilmesi

Dijital kumpas kullanılarak, her bir iş parçası üzerinde 2 cm aralıklarla kesme derinlikleri ölçülmüştür. Bu şekilde her bir kesim için 8 adet ölçüm elde edilmiş ve ölçümlerin ortalaması kesme derinliği olarak kaydedilmiştir (Şekil 32). Her bir kesim için, minimum ve maksimum kesme derinlikleri de ayrıca kaydedilmiştir. Kesme-aşınma bölgesinin derinliği, kesme derinliği ölçümünde takip edilen prosedür referans alınarak belirlenmiştir.



Şekil 32. Kesme derinliğinin ölçümü

Dijital pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak kesme yüzeylerinin yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Ölçümler için her bir kesme yüzeyinde yatay bir ölçüm hattı seçilmiştir (derinliği 5 mm). Yüzey pürüzlülüğü ilgili hat boyunca 2 cm aralıklarla ölçülmüştür (Şekil 33).



Şekil 33. Dijital pürüzlülük ölçüm cihazı

3. BULGULAR VE İRDELEME

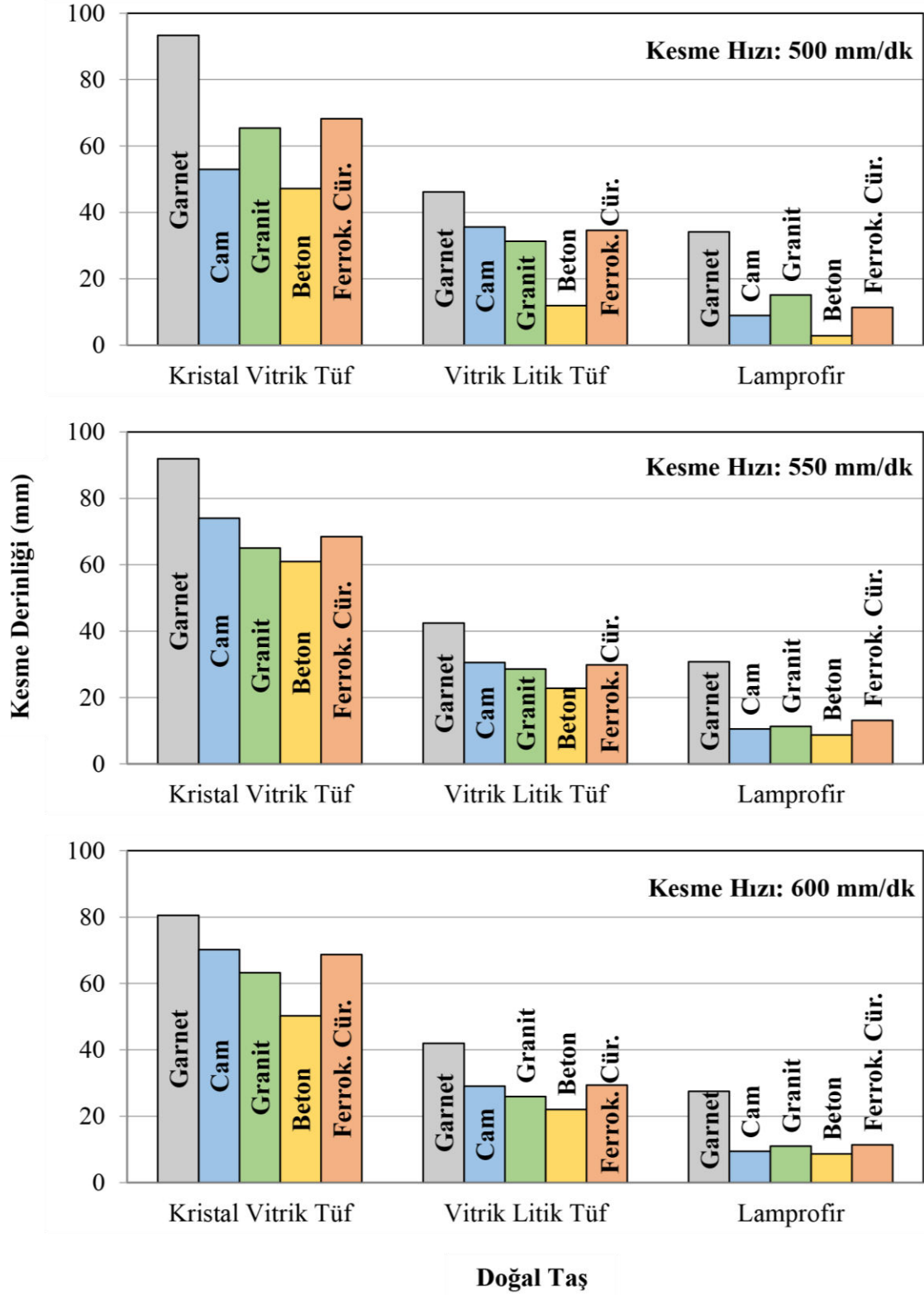
3.1. Kesme ve Kesme-Aşınma Derinliği

Kesme derinlikleri Tablo 13'te sunulmaktadır. Şekil 34'te ise veriler grafik olarak verilmektedir.

Tablo 13. Kesme derinlikleri (mm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	93,32	46,20	34,15
	550	91,90	42,39	30,80
	600	80,53	41,98	27,48
Cam	500	53,00	35,61	8,98
	550	73,99	30,57	10,54
	600	70,18	29,08	9,44
Granit	500	65,42	31,28	15,13
	550	65,00	28,59	11,31
	600	63,23	25,94	10,97
Beton	500	47,16	11,89	2,85
	550	60,94	22,77	8,73
	600	50,22	22,04	8,67
Ferrokrom Cürufu	500	68,23	34,59	11,37
	550	68,44	29,81	13,10
	600	68,68	29,39	11,41

İlerleme hızının artmasıyla kesme derinliklerinde genel olarak azalma eğilimi gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, aşındırıcı ve iş parçası çeşidine bağlı olarak farklı eğilimler mevcuttur. Daha yüksek ilerleme hızı, kesme süresinin azalması anlamına gelmektedir. Birim zamanda iş parçasıyla etkileşimde bulunan jet hacmi azalmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da kesme derinliği azalmaktadır.



Şekil 34. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme derinlikleri

İlerleme hızının kesme derinliği üzerinde etkisi, literatürdeki kaynaklarla örtüşmektedir. Genel eğilim olarak, ilerleme hızı arttıkça kesme derinliği azalmıştır (Hashish, 1989; Hassan & Kosmol, 1997; Karakurt, 2009 & 2011; Niranjan vd., 2018; Kaya, 2022).

İş parçalarının yoğunlukları ve Schmidt sertlikleri ile kesme derinliği arasında ters bir ilişkinin olduğu söylenebilir. Örnek olarak Lamprofir'in Schmidt sertliği ve yoğunluğu, diğer iki doğal taştan daha fazladır. Bunun sonucunda, ilgili doğal taşta ait iş parçası üzerinde daha düşük kesme derinlikleri elde edilmiştir. Diğer taraftan, en düşük sertliğe sahip Kristal Vitrik Tüf'ün kesmesinde en yüksek kesme derinlikleri kaydedilmiştir. İş parçası ve aşındırıcı sertliği arasındaki farkın kesme performansını etkileyen önemli bir faktör olduğu söylenebilir.

Sertlik, iş parçasının aşındırıcıya karşı bir direncidir (sürtünme). Bu sebepten, yüksek sertliğe sahip iş parçalarının kesilmesinde kesim yüzeylerinde sürtünme kaynaklı daha az hasarın oluşması beklenir (Hashish, 1995; Fowler, 2009). Bunun yanında, iş parçasının yoğunluğu aşındırıcının yoğunluğundan fazla olduğu zaman iş parçasının yüzeyi aşındırıcıların darbesinden daha az etkilenmektedir. Bunun sonucunda ise aşındırıcıların etkinlikleri azalmaktadır. Bu ise kesme derinliğinin azalmasına yol açmaktadır (Engin, 2012; Karakurt vd., 2012a; Aydın vd., 2019a; Kaya, 2022).

İş parçalarının tek eksenli basma dayanımı, indirekt çekme dayanımı ve nokta yükü dayanımlarıyla kesme derinliği arasında ters bir ilişkinin olduğu gözlenmiştir. İş parçalarının dayanımı arttıkça kesme derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Tek eksenli basma dayanımı, nokta yükü dayanımı ve indirekt çekme dayanımı arasında doğru orantılı, yüksek korelasyonlu ilişkiler mevcuttur (ISRM, 2007; Nazir vd., 2013; Kabilan & Muttharam, 2016; Saeed & Alshkane, 2018). Tek eksenli basma dayanımı, aşınmasına karşı bir direnç indeksi olarak kabul edilebilir (Oh & Cho, 2014). Dayanımı yüksek olan bir doğal taş ile düşük dayanımlı bir doğal taş karşılaştırıldığında, yüksek dayanımlı doğal taşın kesiminin daha uzun süreceği söylenebilir. Bu durum, yüksek dayanıma sahip doğal taşın jetin enerjisine daha fazla direnç göstermesinden kaynaklanmaktadır (Karakurt, 2010; Kaya, 2022).

Böhme aşınma kaybı yüksek olan iş parçalarında, daha yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir. Bilindiği gibi ASJ ile kesmede aşındırıcı taneler iş parçasına çarpmakta ve iş parçası aşındırılmaktadır. Bu süreç, jetin aşındırma proseslerinde böhme aşınma kaybının önemli bir özellik olduğuna işaret etmektedir.

İlgili literatürle uyumlu olarak (Engin, 2012), doğal taşların su emme kapasitesi, porozitesi ve boşluk oranındaki artışın kesme derinliğini arttırdığı görülmüştür. ASJ ile doğal taşların kesilmesinde mikron boyutlu aşındırıcılar kullanılmaktadır. Bu sebepten doğal taşların mikro yapıları kesme sürecini etkileyebilmektedir. Jetin iş parçası gözeneklerinde daha hızlı bir şekilde hareket etmesi olasıdır. Bunun sonucunda ise iş parçası daha kolay kesilebilmektedir (Engin, 2012).

Aşındırıcıların arasında yoğunlukları en az olan cam ($2,5 \text{ gr/cm}^3$) ve beton ($2,44 \text{ gr/cm}^3$), farkı doğal taşlarda genel olarak en düşük performansı (düşük kesme derinliği) sergilemiştir. Schüler vd. (2021), aşındırıcıların yoğunluğu ile jetin kinetik enerjisinin yakın ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Diğer bir deyişle, aşındırıcıların yoğunluğunun yüksek olması, jetin kinetik enerjisinin fazla olmasına imkân sağlamaktadır. Bu ise kesme derinliğini arttırmaktadır (Agus vd., 2000). Aydın vd. (2019a), aşındırıcının yoğunluğunun kesme performansı ile yakından ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmacılara göre kesme uygulamalarında sertliği yüksek iş parçalarının kesilebilmesi için daha yüksek miktarda kinetik enerji gerekmektedir. Bu enerji, su yoğunluğuna kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip aşındırıcı parçacıklarda depolanabilmektedir. Bu sebepten, genelde yoğunluğu az olan aşındırıcıların kullanıldığı kesimlerde daha düşük kesme derinlikleri elde edilmiştir.

Aşındırıcıların sertliği ile kesme derinliği arasında genel olarak doğru orantılı bir ilişki elde edilmiştir. Su akışı koşullarından dolayı aşındırıcı taneler, birbirleriyle ve odaklama tüpüyle çarpışmakta ve aşınmaya maruz kalmaktadır (Zaremba vd., 2015). Bu parçalanmanın derecesi aşındırıcının kesme performansını etkilemektedir (Aydın, 2014; Aydın, 2015). Yüksek sertliğe sahip aşındırıcıların sürtünme kaynaklı bu aşınma süreçlerinden daha az etkilendiği söylenebilir. Bu aşınma süreci, düşük sertlikteki aşındırıcı tanelerin daha kolay ayrışmasına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda kinetik enerji ayrışan aşındırıcı tanecikleri arasında paylaşılmaktadır. Böylelikle, jetin hareket yönü değişmekte ve kesme derinliği azalmaktadır (Agus vd., 2000; Fowler, 2009; Aydın vd., 2013b; Karakurt vd., 2014; Aydın, 2019; Natarajan vd., 2020).

Her kesim için kesme hattı boyunca ölçülen kesme derinliklerinin değer aralıkları kaydedilmiştir (Tablo 14). Jetin enerji profilindeki değişim, iş parçasının özellikleri (mineral bileşimi, kırıklar vd.) ve çakılma bölgesinde meydana gelen türbülansın oturu kesme hattı boyunca farklı kesme derinlikleri elde edilebilmektedir.

Tablo 14. Ölçülen kesme derinliklerinin değer aralıkları (mm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	69,24-104,3	40,35-53,7	26,85-41,84
	550	76,64-116,44	35,91-47,96	25,84-34,75
	600	71,46-91,28	34,26-48,76	20,49-36,83
Cam	500	27,77-68,9	30,86-40,06	6,06-12,25
	550	60,63-85,57	26,34-36	6,96-13,03
	600	63,6-77	23,62-34,1	6,98-12,86
Granit	500	60,75-70	27-38,92	13,42-17,07
	550	56,21-75,52	25-33,9	5,9-15,59
	600	53,27-67,45	17,8-32,07	7,83-16,5
Beton	500	33,22-58,96	9,68-15,31	1,82-4,88
	550	25,52-80,74	18,5-28,68	5-13,77
	600	20,65-66,04	18,16-26,37	4,1-13,7
Ferrokrom Cürufu	500	56,77-83,9	30,6-39,27	4,81-15,73
	550	58,48-88,2	6,46-42,75	4,8-19,37
	600	51,05-80,12	21,98-36,29	6,42-15,48

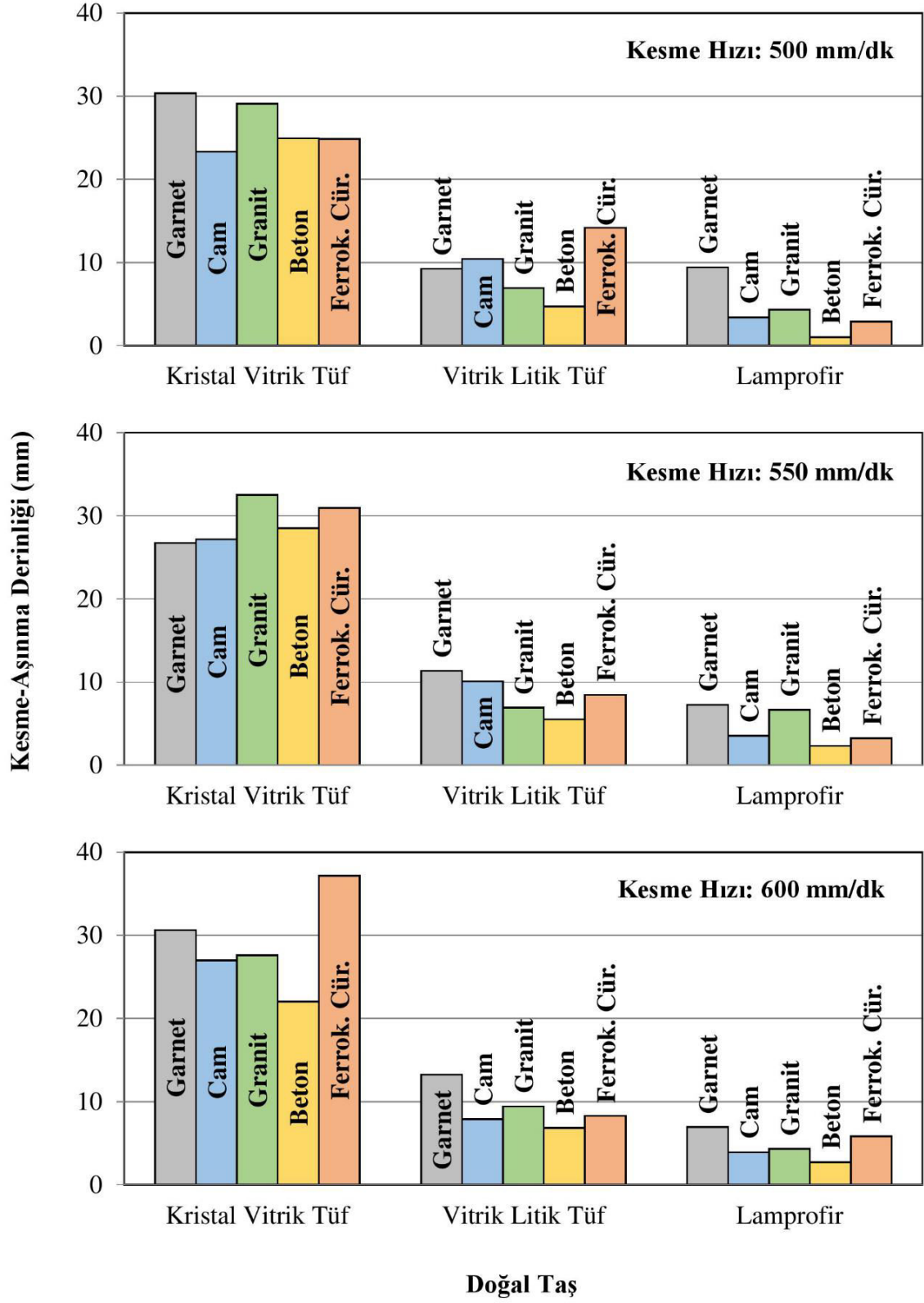
Kesme derinliğine ek olarak, kesme performansı açısından değerlendirilmesi gereken bir diğer faktör kesme-aşınma derinliğidir. Kesme-aşınma bölgesindeki yüzeyler, deformasyon-aşınma bölgesindeki yüzeylere göre daha pürüzsüzdür. Bu nedenle, daha büyük kesme-aşınma derinliği daha iyi bir kesme performansına işaret etmektedir. Kesme-aşınma derinlikleri Tablo 15'te sunulmaktadır. Kesme-aşınma bölgesi derinliğinin değişken bir yapıya sahip olduğu ve kesim hattı düz bir çizgide olmadığı kaydedilmiştir. Kesme-aşınma derinliği ölçümleri, bu düzensiz yapının bir sonucu olarak değişiklik göstermiştir (Şekil 35).

Tablo 15. Kesme-aşınma derinlikleri (mm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	30,34	9,23	9,43
	550	26,71	11,32	7,27
	600	30,62	13,23	6,96
Cam	500	23,32	10,43	3,39
	550	27,16	10,07	3,55
	600	26,98	7,89	3,91
Granit	500	29,09	6,92	4,31
	550	32,50	6,93	6,68
	600	27,60	9,43	4,33
Beton	500	24,93	4,70	-
	550	28,50	5,50	2,33
	600	22,02	6,84	2,69
Ferrokrom	500	24,85	14,18	2,87
Cürufu	550	30,94	8,46	3,23
	600	37,16	8,29	5,81

İlerleme hızının kesme-aşınma derinliği üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bunun başlıca nedeni, ilerleme hızındaki değişimlerin dar bir aralıkta gerçekleşmiş olmasıdır. Hashish (1988), ilerleme hızının kesme-aşınma bölgesi derinliği üzerinde özellikle yüksek ilerleme hızlarında (> 450 mm/dk) etkili bir parametre olmayabileceğini belirtmiştir. Hasçalık vd. (2007), ilerleme hızının kesme-aşınma bölgesi derinliği üzerindeki etkisinin yüksek hızlarda azaldığını belirtmişlerdir. İş parçası özelliklerinin kesme-aşınma bölgesi derinliği üzerindeki etkisi ise kesme derinliğiyle benzerlikler arz etmektedir.

Kesme derinliğinin maksimum ve minimum derinlik değerleri gibi, kesme-aşınma bölgesinde de bu değerler önemlidir. Kesme-aşınma bölgesi derinliğinin minimum değerinin, kesme-aşınma derinliğinin ortalamasına yakın olması arzu edilen durumdur (Tablo 16).



Şekil 35. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme-aşınma derinlikleri

Tablo 16. Maksimum ve minimum kesme-aşınma derinliği (mm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	56,48-24,18	20,50-9,50	12,53-7,81
	550	53,75-22,47	15,24-6,11	13,19-4,19
	600	40,62-26,00	17,84-9,48	17,22-8,68
Cam	500	42,05-5,89	16,11-7,07	4,41-1,81
	550	54,23-21,86	13,18-4,88	4,33-1,01
	600	39,69-19,73	12,15-6,84	5,40-2,68
Granit	500	34,39-17,09	11,85-5,54	6,86-4,05
	550	47,00-34,31	11,32-5,62	12,63-3,00
	600	51,00-24,31	11,3-5,85	5,01-3,05
Beton	500	37,59-16,58	6,75-2,00	-
	550	28,91-21,01	8,55-4,43	2,75-1,05
	600	29,42-5,56	10,45-5,22	3,60-1,29
Ferrokrom Cürufu	500	36,77-14,97	15,65-5,70	3,10-2,60
	550	50,29-24,62	15,63-2,57	3,80-2,20
	600	45,25-25,09	12,41-6,73	7,80-3,68

Kesme-aşınma derinliğinin de kesme derinliği gibi yüksek olması istendiğinden dolayı, kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği oranı da yüksek olması istenmektedir. Tablo 17’de kesme-aşınma derinliğinin kesme derinliğine oranı sunulmaktadır. Genel olarak ilerleme hızı yükselince bu oran düşmektedir. Tablo 17’deki oranların aralıkları 0,20 ile 0,54 arasında olup literatürlere örtüşmektedir (Kaya, 2022).

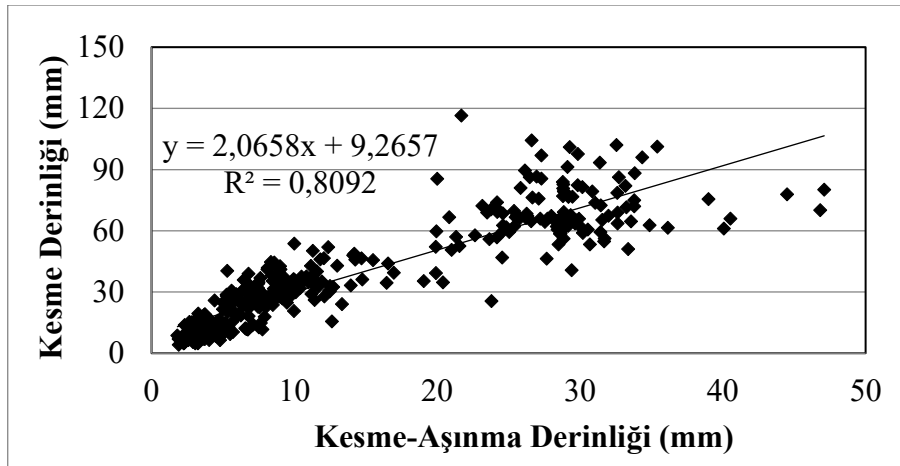
Tablo 18’de her aşındırıcı için kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyonlar verilmektedir. Kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasında çok yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. Şekil 36’da her aşındırıcı için kesme-aşınma derinliğine karşılık gelen kesme derinliklerinin dağılım grafiği görülmektedir.

Tablo 17. Kesme-aşınma derinliği/kesme derinliği oranı

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	0,33	0,20	0,28
	550	0,29	0,27	0,24
	600	0,38	0,32	0,25
Cam	500	0,44	0,29	0,38
	550	0,37	0,33	0,34
	600	0,38	0,27	0,41
Granit	500	0,44	0,22	0,28
	550	0,50	0,24	0,59
	600	0,44	0,36	0,39
Beton	500	0,53	0,40	-
	550	0,47	0,24	0,27
	600	0,44	0,31	0,31
Ferrokrom Cürufu	500	0,36	0,41	0,25
	550	0,45	0,28	0,25
	600	0,54	0,28	0,51

Tablo 18. Farklı aşındırıcı tipleri için kesme ve kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı	Garnet	Cam	Granit	Beton	Ferrokrom Cürufu
r	0,91	0,95	0,94	0,94	0,92



Şekil 36. Aşındırıcı çeşidinden bağımsız olarak (tüm verilerin kullanıldığı) kesme ve kesme-aşınma derinliği arasındaki ilişki

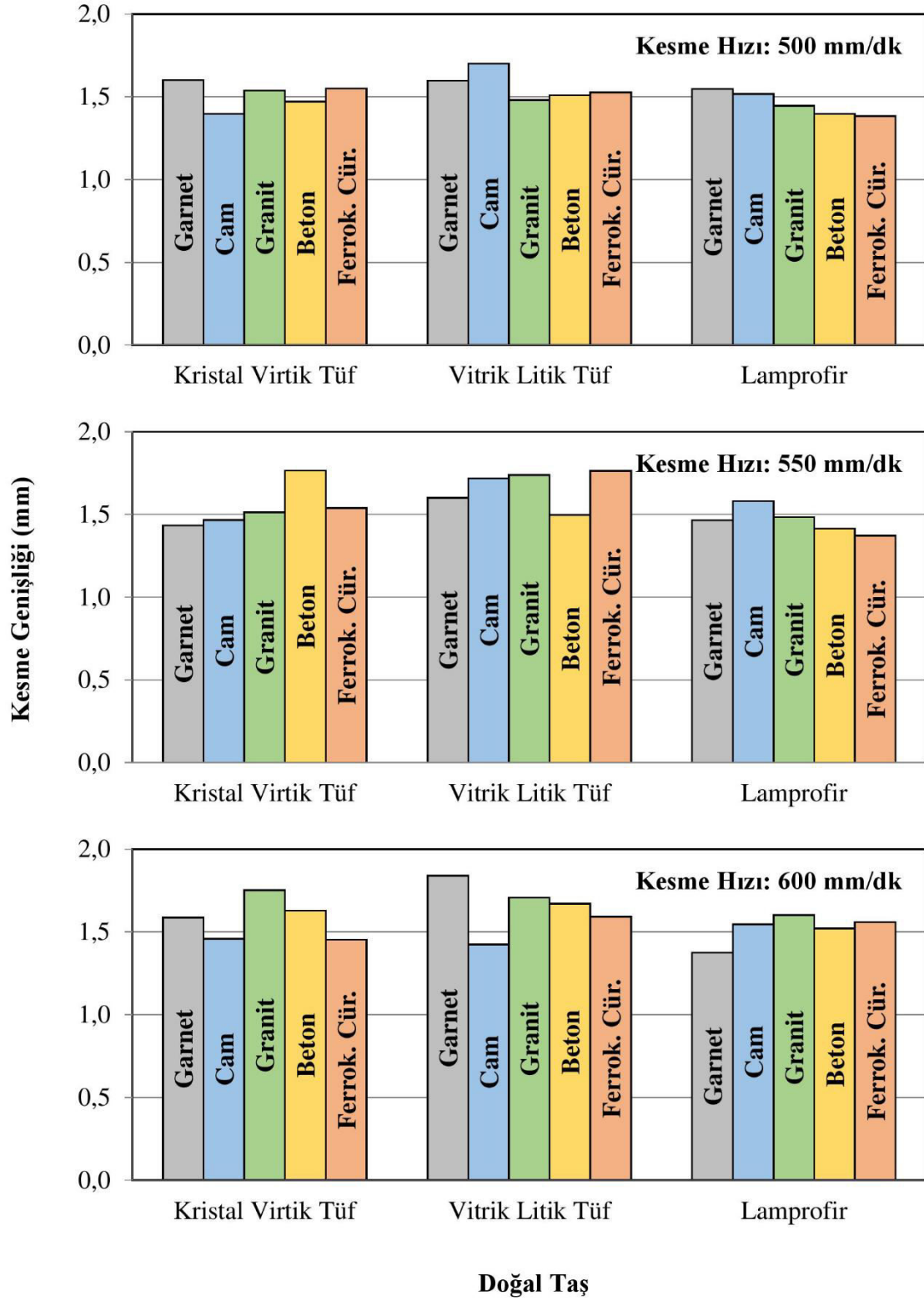
3.2. Kesme Genişliği

Tablo 19, kesme genişliği değerlerini göstermektedir. Kesme genişliklerinin dar bir aralıktaki (1,37-1,84 mm) değiştiği görülmektedir (şekil 37). Genel olarak, kesme genişliğinin ilerleme hızındaki değişimlerden etkilenmediği belirlenmiştir. Literatürde, nozul-iş parçası mesafesi kesme genişliğini etkileyen en önemli parametre olarak tanımlanmıştır (Konig & Wulf, 1984; Arola & Ramulu, 1996; Wang, 1999; Aydın vd., 2017). Bu araştırmada, tüm deneyler için nozul-iş parçası mesafesi (4 mm) sabit tutulmuştur.

Tablo 19. Kesme genişliği değerleri (mm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tf	Vitrik Litik Tf	Lamprofir
Garnet	500	1,60	1,60	1,55
	550	1,43	1,60	1,46
	600	1,59	1,84	1,38
Cam	500	1,40	1,70	1,52
	550	1,47	1,72	1,58
	600	1,46	1,42	1,55
Granit	500	1,54	1,48	1,45
	550	1,51	1,74	1,48
	600	1,75	1,71	1,60
Beton	500	1,47	1,51	1,40
	550	1,77	1,50	1,42
	600	1,63	1,67	1,52
Ferrokrom Cürufu	500	1,55	1,53	1,38
	550	1,54	1,76	1,37
	600	1,45	1,59	1,56

Aşındırıcıların ve doğal taşların fiziksel ve mekanik özelliklerinin kesme genişliğine etkilerine bakıldığında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır (Kaya, 2016; Aydın vd., 2019a).



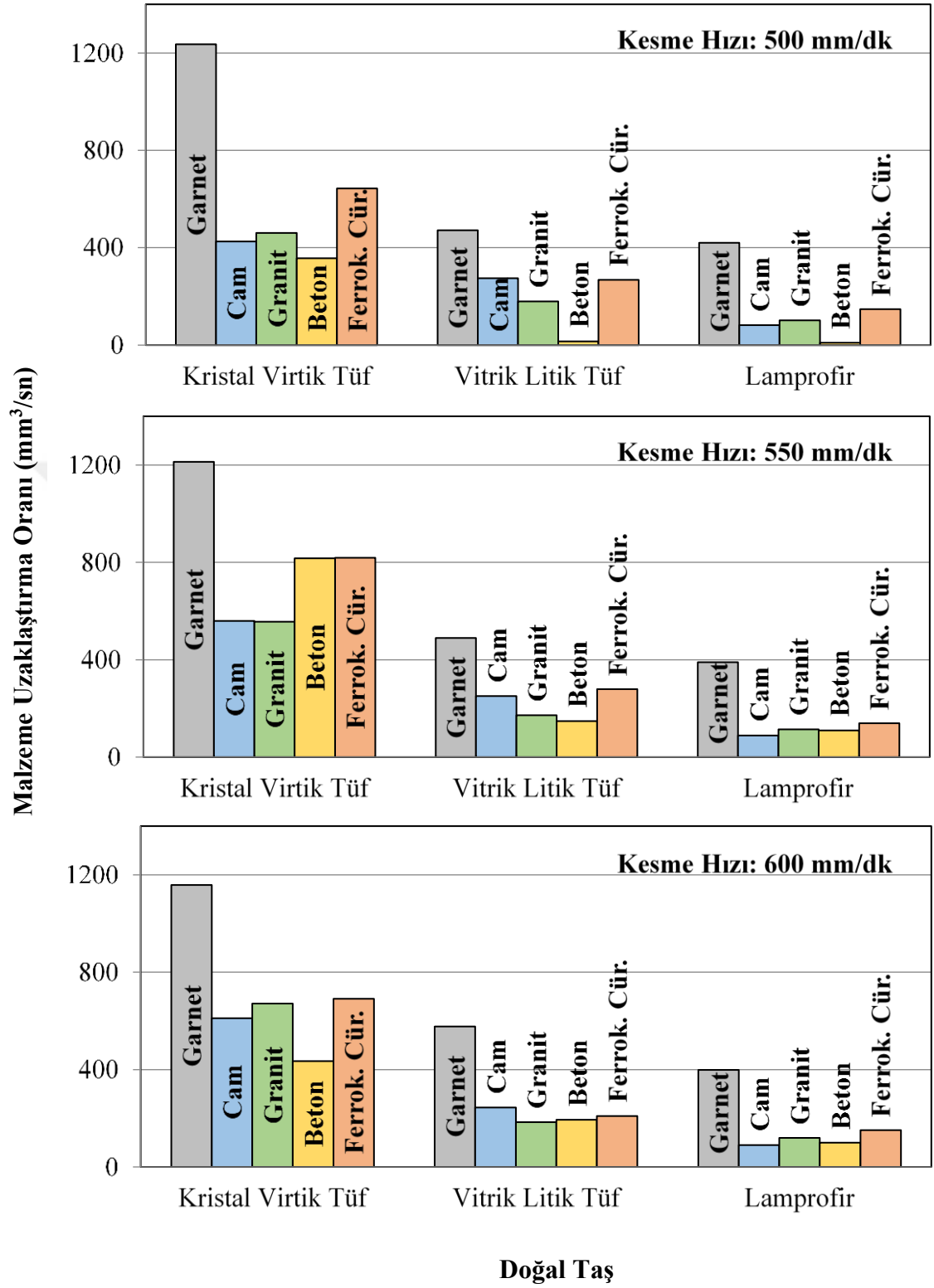
Şekil 37. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kesme genişlikleri

3.3. Malzeme Uzaklaştırma Oranı

Tablo 20’de malzemelerin uzaklaştırma oranları sunulmaktadır. İlerleme hızındaki değişimlere bağlı olarak malzeme uzaklaştırma oranında dar bir aralıkta değişimin meydana geldiği görülmektedir (tanımlanabilir bir trend yok) (Şekil 38). Bilindiği gibi, malzeme uzaklaştırma oranı, kesme derinliği ve kesme genişliği değerlerinin bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Önceki bölümde de bahsedildiği gibi araştırma kapsamında birbirine yakın kesme genişlikleri elde edilmiştir. Bu sebepten malzeme uzaklaştırma oranı kesme derinliği ile yakından ilişkilidir. Başka bir değişle, yüksek kesme derinlikleri yüksek malzeme uzaklaştırma oranlarına işaret etmektedir (Karakurt vd., 2011b). Dolayısıyla, iş parçası ve aşındırıcı özelliklerinin kesme derinliği üzerine etkisi, malzeme uzaklaştırma oranı için de geçerli olmaktadır.

Tablo 20. Malzeme uzaklaştırma oranları (mm³/sn)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	1235,52	471,50	420,05
	550	1213,24	489,95	390,16
	600	1158,15	577,62	398,42
Cam	500	425,25	274,57	81,67
	550	559,93	251,01	89,27
	600	610,60	244,50	89,61
Granit	500	460,64	179,05	101,08
	550	556,14	171,69	114,18
	600	671,08	184,25	119,33
Beton	500	357,14	15,62	9,89
	550	816,99	147,80	110,00
	600	435,23	193,44	100,31
Ferrokrom Cürufu	500	644,04	267,55	147,59
	550	818,74	278,85	139,29
	600	690,60	209,65	150,80

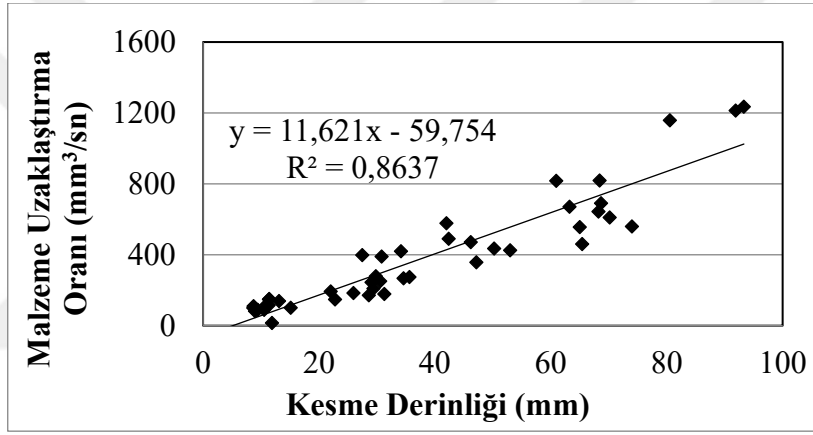


Şekil 38. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen malzeme uzaklaştırma oranları

Tablo 21’de her aşındırıcı için kesme derinliği ile malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki korelasyonlar sunulmuştur. Anlaşılacağı gibi, kesme derinliği ile malzeme uzaklaştırma oranı arasında çok yüksek korelasyonlar elde edilmiştir. Şekil 39 ise aşındırıcı tipine göre malzeme uzaklaştırma oranı ve kesme derinliği ilişki eğilimlerini göstermektedir.

Tablo 21. Farklı aşındırıcı tipleri için kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı	Garnet	Cam	Granit	Beton	Ferrokrom Cürufu
r	0,99	0,99	0,95	0,93	0,97



Şekil 39. Aşındırıcı çeşidinden bağımsız olarak (tüm verilerin kullanıldığı) kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki ilişki

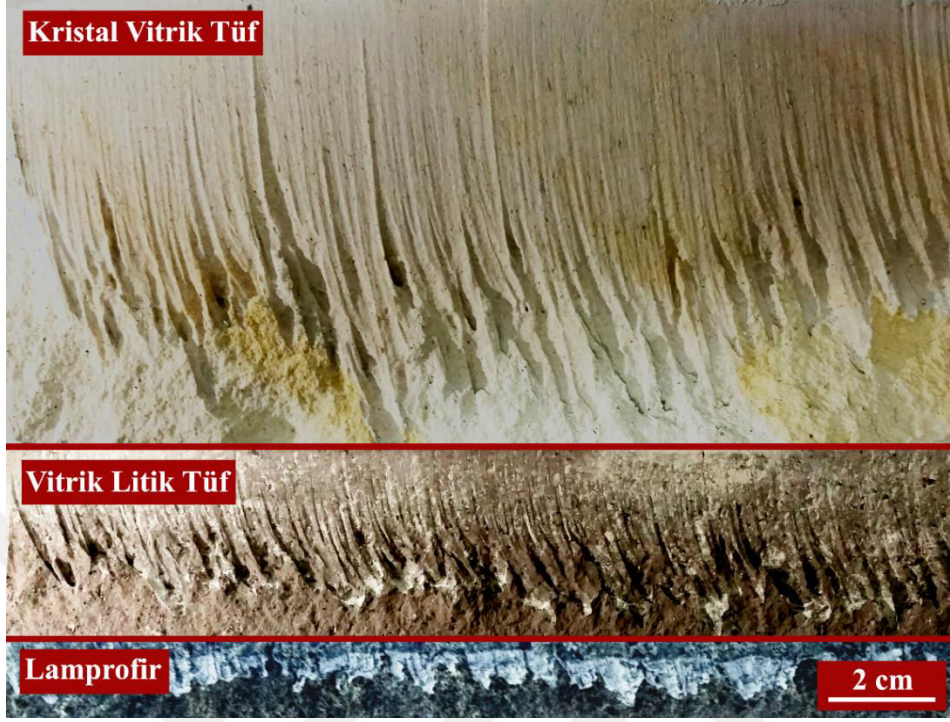
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Şekil 40-44’te, farklı aşındırıcılar ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri gösterilmektedir. Kesme derinliğinin artmasıyla birlikte kesme yüzeylerinde çiziklerin meydana geldiği (kesme yönüne ters yönde) ve dalgalanmaların arttığı gözlenmiştir. Kesme iç yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri Tablo 22’de verilmektedir.

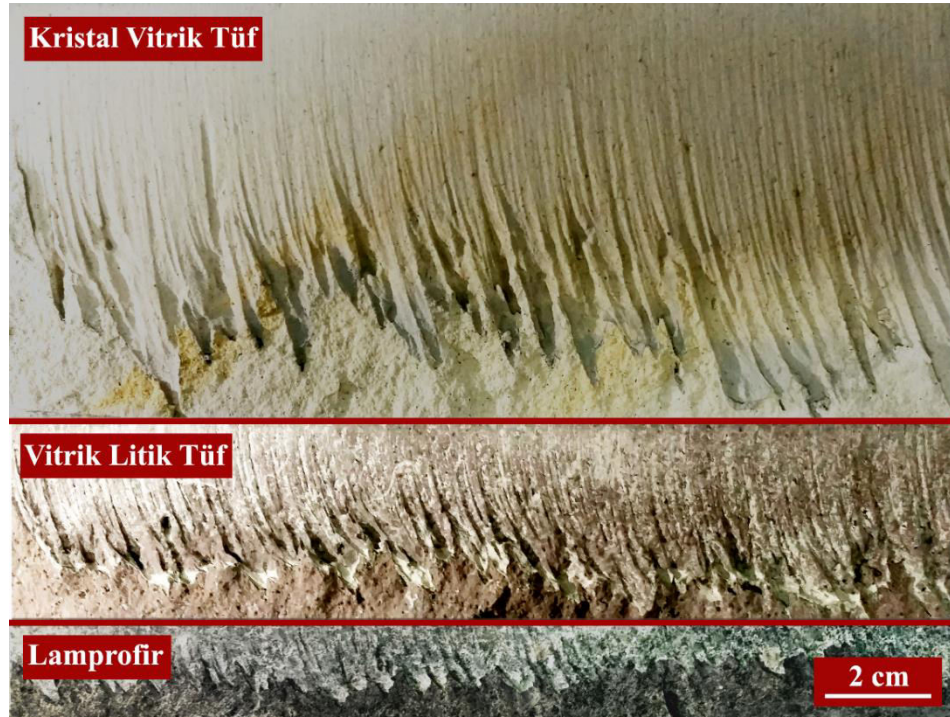
İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne sınırlı bir etkisinin olduğu söylenebilir (ilerleme hızının dar bir aralıkta değişmesinden ötürü). Aşındırıcıların ve iş parçalarının özellikleri ile yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır (Şekil 45).



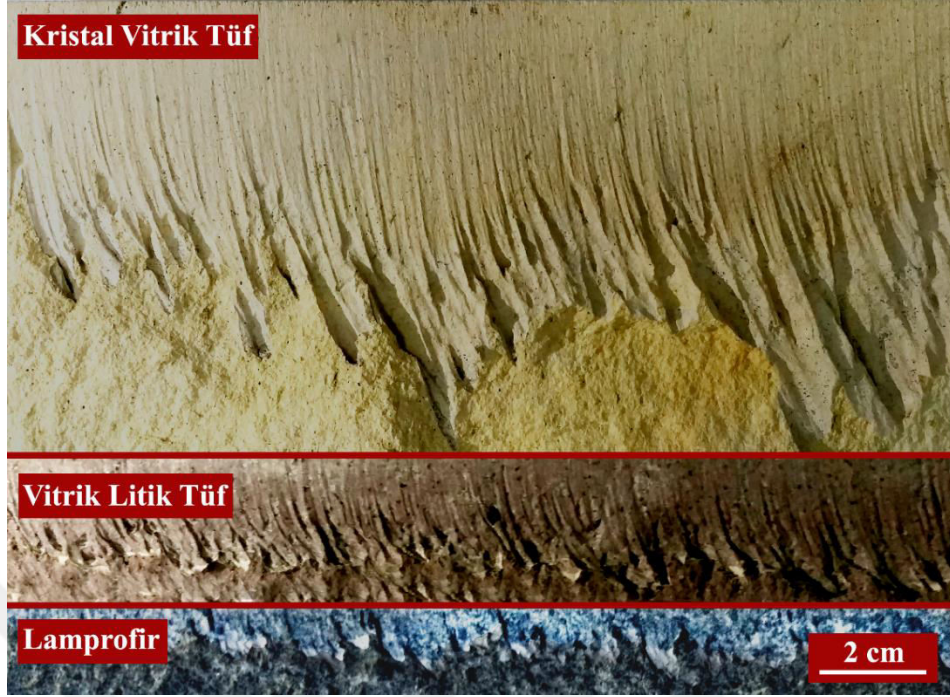
Şekil 40. Garnet aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri



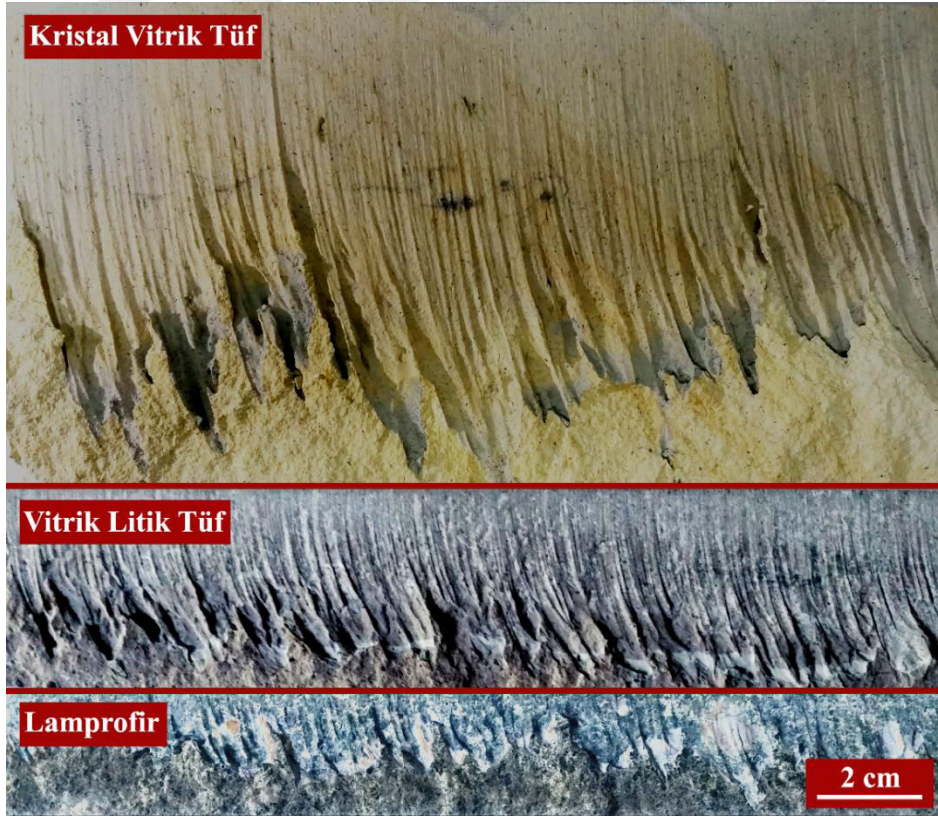
Şekil 41. Cam aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri



Şekil 42. Granit aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri



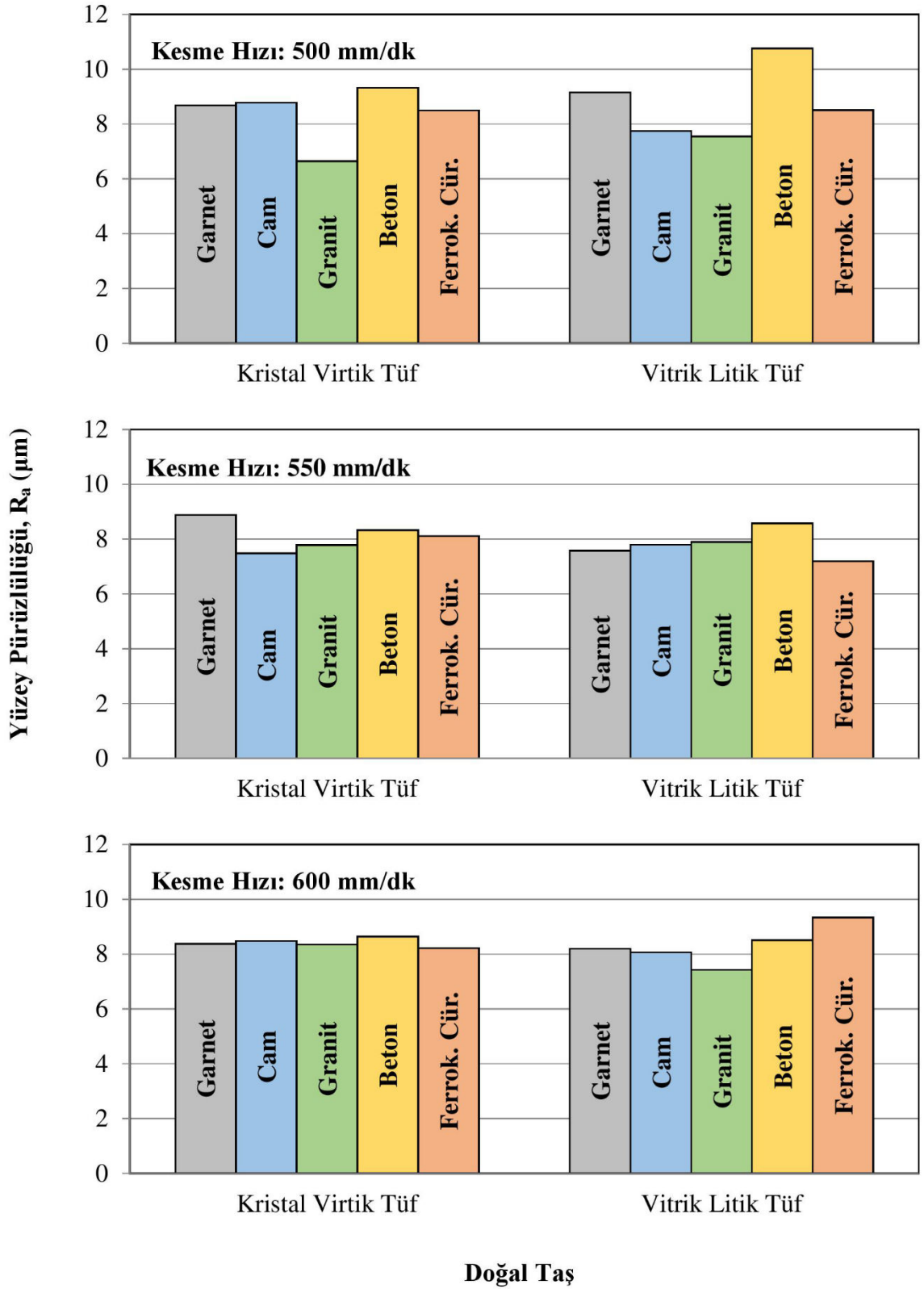
Şekil 43. Beton aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri



Şekil 44. Ferrokrom cürufu aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kesme yüzeyleri

Tablo 22. Yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a , μm)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	8,69	9,15	7,54
	550	8,88	7,57	7,78
	600	8,37	8,20	7,79
Cam	500	8,78	7,74	Değer yok!
	550	7,48	7,79	
	600	8,48	8,06	
Granit	500	6,64	7,54	Değer yok!
	550	7,78	7,89	
	600	8,35	7,43	
Beton	500	9,33	10,75	Değer yok!
	550	8,32	8,57	
	600	8,64	8,51	
Ferrokrom Cürufu	500	8,49	7,41	Değer yok!
	550	8,11	7,19	10,25
	600	8,21	9,33	Değer yok!

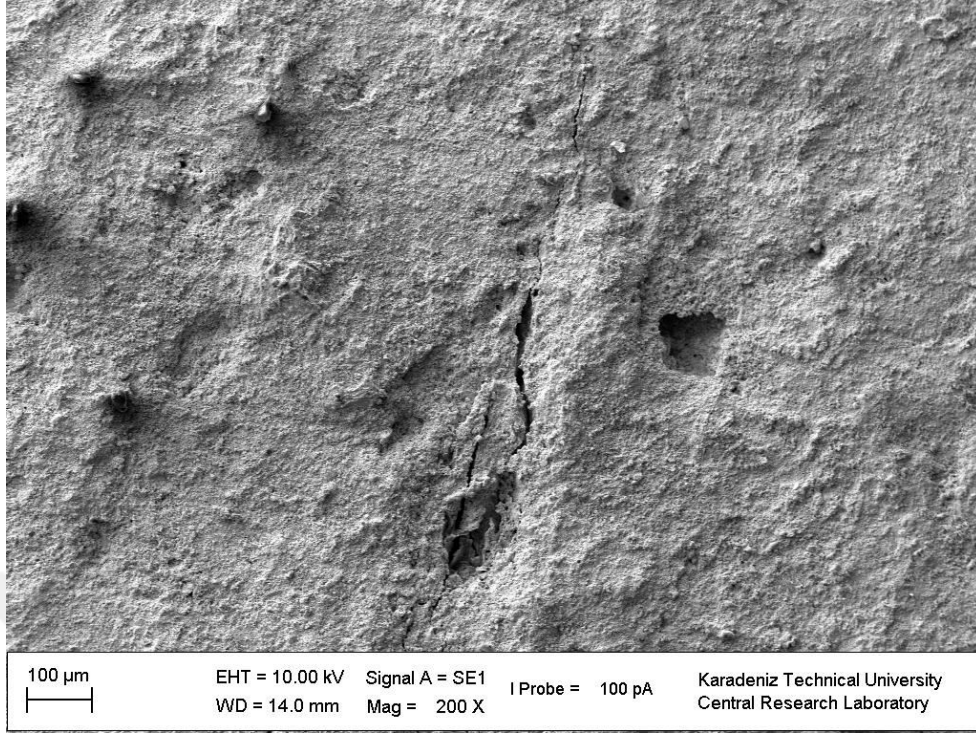


Şekil 45. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri (Lamprofir doğal taşının kesim yüzeylerinden yeterli sayıda pürüzlülük değerleri elde edilemediğinden şekilde yer verilmemiştir)

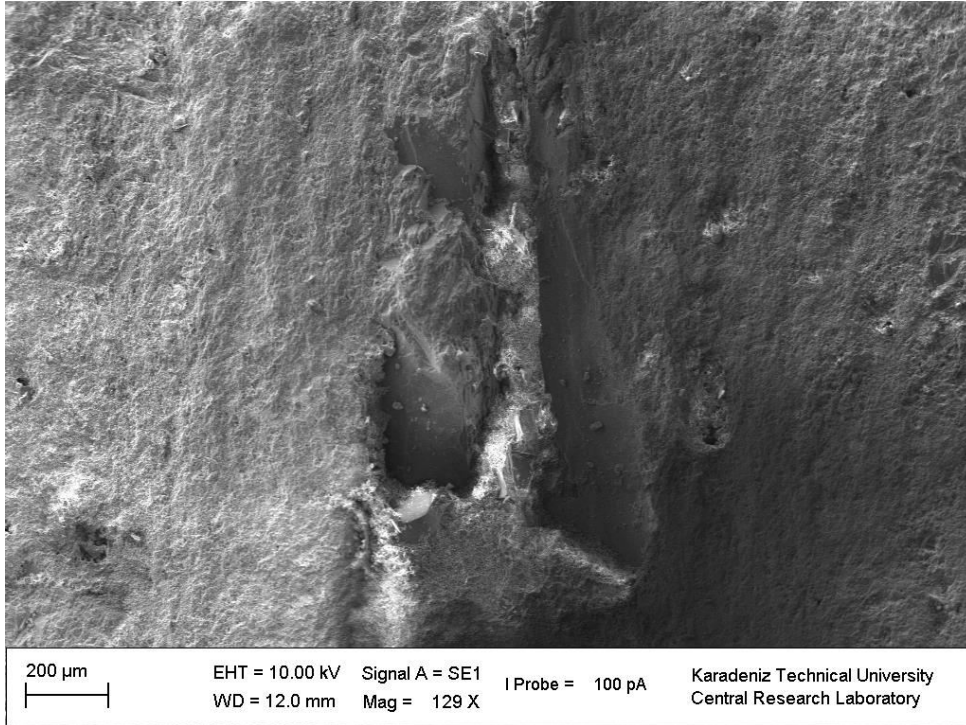
3.4.1. SEM Analizleri

Kesme yüzeylerinden elde edilen SEM görüntülerin analizi sonucunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

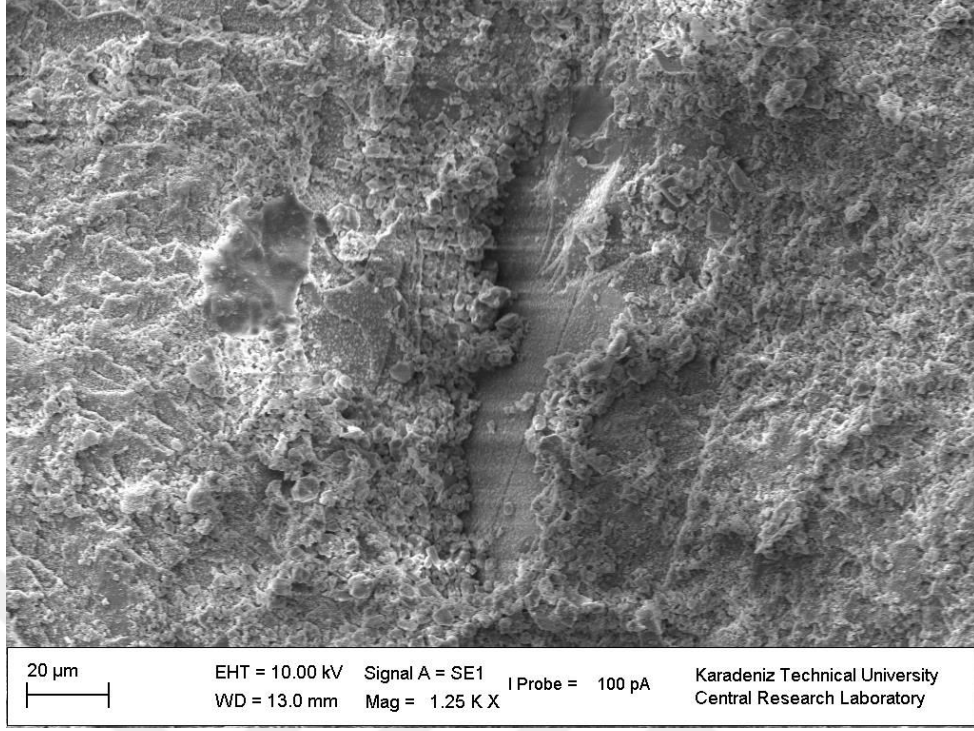
- i. Bazı kesim yüzeylerinde mikro çatlaklar görülmüştür (Şekil 46).
- ii. Kesim yüzeylerine gömülmüş aşındırıcı taneler dikkat çekmektedir (Şekil 46). Bu tür olaylar ‘aşındırıcı gömme’ olarak tanımlanmaktadır (Fowler vd., 2005). İş parçalarının arasında bu olay sadece Kristal Vitrik Tüf (düşük sertlik ve yoğunluk) doğal taşında görülmektedir.
- iii. Kesme yüzeylerinde boşluklar da görülmektedir (Şekil 46). Bu boşluklar aşındırıcıların etkisiyle oluşabileceği gibi iş parçasının içerisinde doğal olarak oluşmuş boşluklar olarak da gözlemlenebilir. Doğal boşlukların miktarı, doğal taşın kesilmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Jetin ilgili boşluklara nüfuz etmesiyle kesme yüzeylerinde küçük yanal çatlamlar meydana gelebilmektedir. Çatlamlar sonucunda meydana getirilen yapı, sonraki aşındırma süreçlerinde jet tarafından yüzeyden uzaklaştırılmaktadır (Momber & Kovacevic, 1998).
- iv. İş parçası yüzeyindeki aşındırıcı (cam) izleri Şekil 47-48’de gösterilmektedir. Bu yapılar, jetteki aşındırıcı taneciklerin neden olduğu mikro-sabanlama aşınmalarını gösteren morfolojik bir deformasyondur. Bu durum sertliği düşük iş parçalarında daha belirgindir.
- v. Şekil 49’da iş parçası yüzeyinden (Lamprofir) koparılan tanecikler görünmektedir.
- vi. Şekil 50’de görüldüğü gibi, iş parçası (Kristal Vitrik Tüf) yüzeylerinden granit taneleri ile büyük parçalar kopmuştur. Bu parçalar yüzeyden koparılıp sürüklenerek (süpürerek kesme-smeared) ortamdan uzaklaştırılmaktadır (Kaya, 2022).
- vii. Önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, iş parçaların kesiminde farklı kalitede kesme yüzeyleri elde edilmiştir. Şekil 51’de üç farklı iş parçasının yüzey kalitesi görülmektedir.



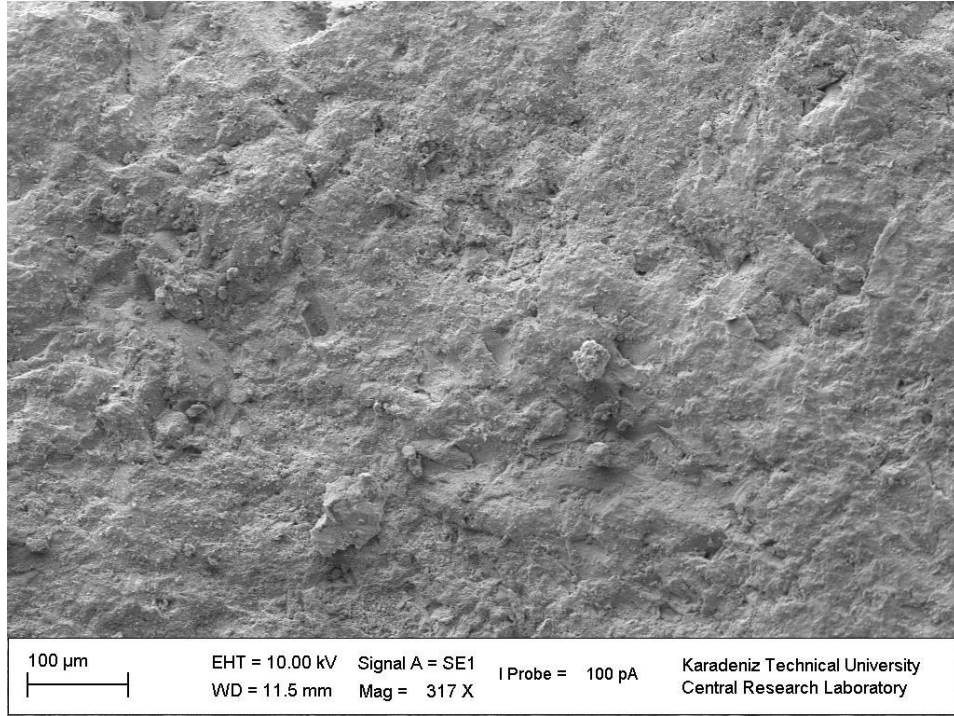
Şekil 46. İş parçası kesme yüzeyinde (Kristal Vitrik Tuf) aşındırıcı tanelerin (cam) yol açtığı mikro çatlama



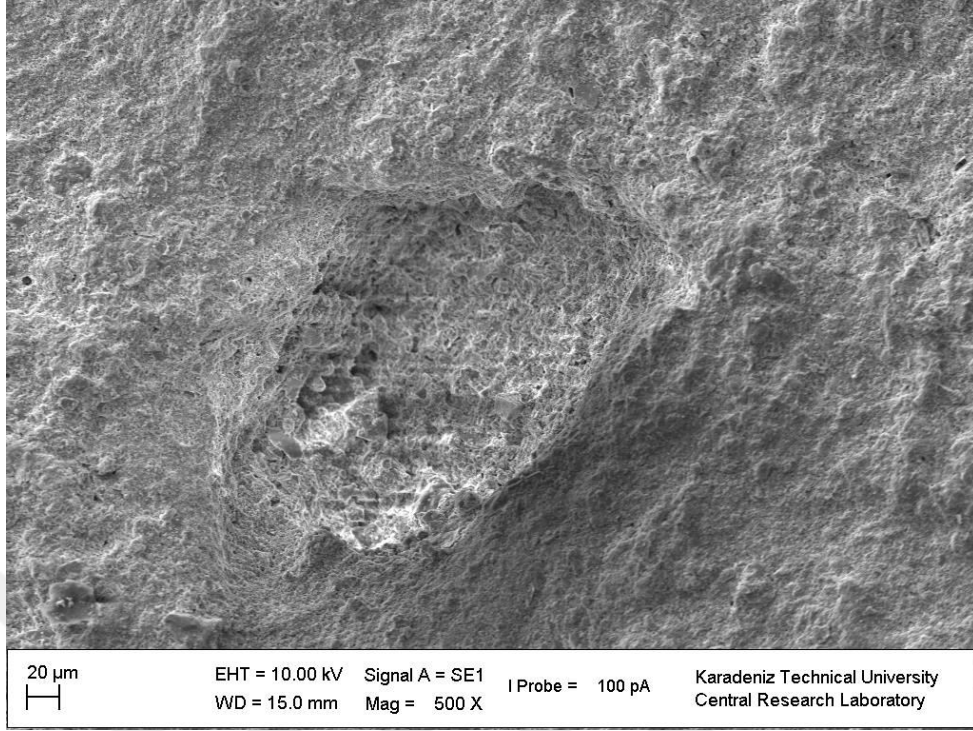
Şekil 47. İş parçası (Kristal Vitrik Tuf) yüzeyinde gözlenen mikro sabanlama aşınması



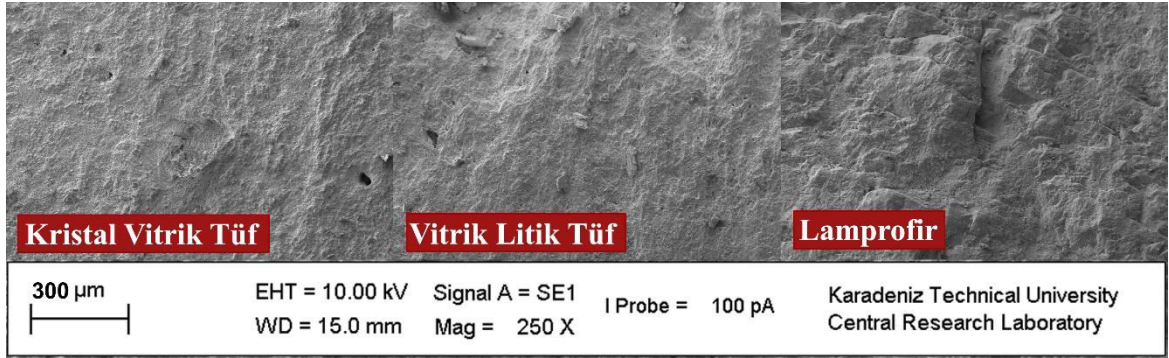
Şekil 48. Kesimden sonra iş parçasının (Vitrık Litik Tüf) yüzeyinde oluşan mikro sabanlama aşınması



Şekil 49. İş parçasının (Lamprofır) yüzeyinden kopan ve sürüklenen parçacıklar



Şekil 50. İş parçası (Kristal Vitrik Tüf) yüzeyinden aşındırıcı parçacıkları (granit) ile malzemenin koparılması sonucu oluşan yüzey



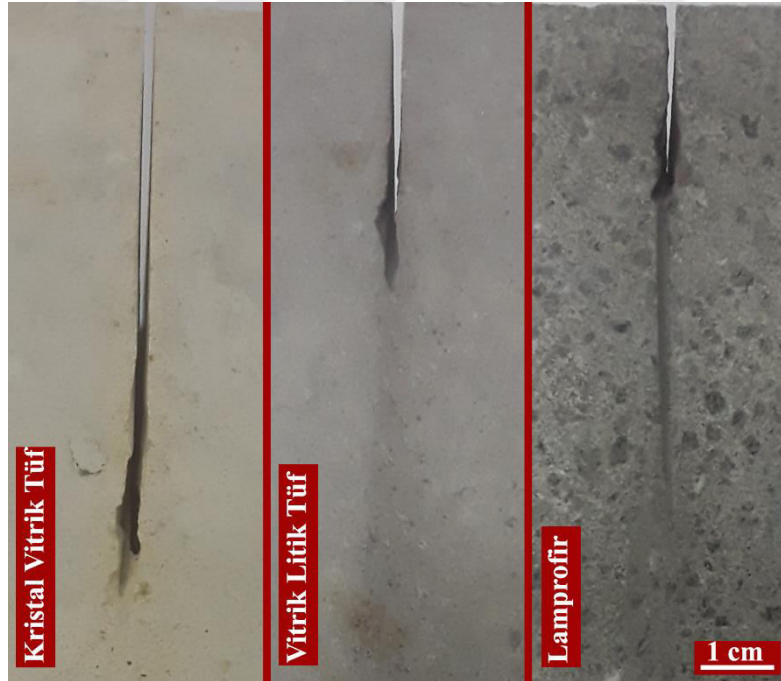
Şekil 51. Farklı iş parçalarına ait kesme yüzeylerinin görüntüleri

3.5. Kerf Açısı

Kesme derinliği boyunca azalan kinetik enerjinin bir sonucu olarak kerf genişliği azalmaktadır. Şekil 52-56’da görüldüğü gibi, kerf V harfine benzer bir yapıya sahiptir. Ancak kerfin en alt bölgesinde bu yapı bozulmaktadır. ASJ ile kesme esnasında kesimin en dip noktasında jet kendisine çıkış yolu bulmak için farklı yönlerde iş parçasına kuvvet uygulamaktadır. Bunun sonucu olarak, iş parçasının alt yüzeylerinde bir türbülans meydana gelmekte ve jet çakılma bölgesi olarak isimlendirilen kısım oluşturulmaktadır (Kaya, 2022). Çakılma bölgesi (Şekil 57), jetin geri yansıdığı bölge olarak adlandırılabilir.

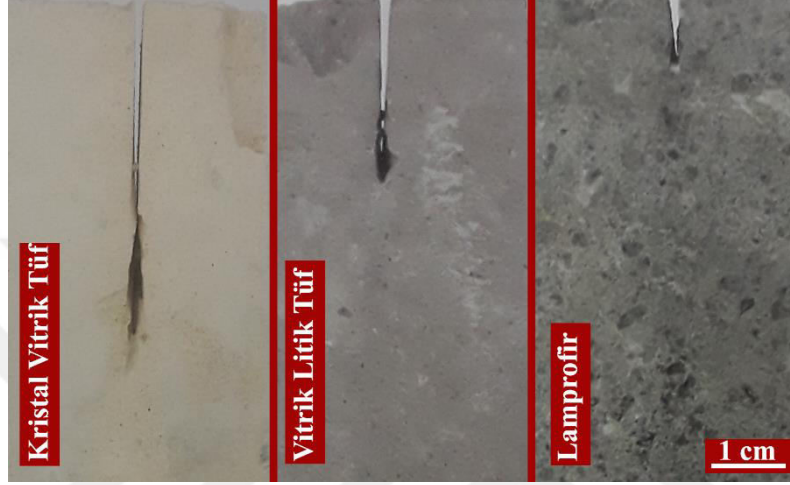
İş parçalarının kerf açısı değerleri de Tablo 23’te verilmektedir. İlerleme hızı ve kerf açısı arasında tanımlanabilir bir trend elde edilememiştir.

Düşük dayanım ve sertliğe sahip iş parçalarının üzerinde genellikle düşük kerf açılarının elde edildiği görülmüştür (Şekil 58). Daha önceki bölümde (Bölüm 3.2) de bahsedildiği gibi kesme genişlikleri dar bir aralıkta değişmektedir. Bunun yanında iş parçaları üzerinden elde edilen kesme derinlikleri arasında kayda değer farklılıklar söz konusudur.

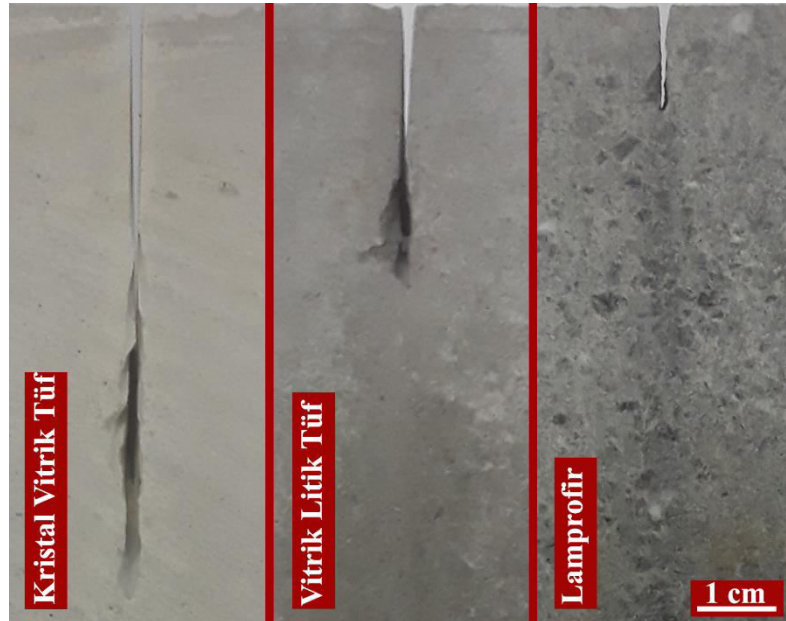


Şekil 52. Garnet aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri

Bu açıklamalar temelinde düşük kesme derinliğine sahip iş parçalarında yüksek kerf açılarının elde edilmesi beklenebilir. Bu kapsamda, kesme derinliği üzerinde etkin rol oynayan doğal taş özelliklerinin kerf açısını belirlemede de benzer bir etki yaratacağı söylenebilir (Karakurt vd., 2011b; Karakurt vd., 2012b; Aydın vd., 2012; Engin, 2012; Aydın vd., 2013a; Aydın vd., 2013b).



Şekil 53. Cam aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri

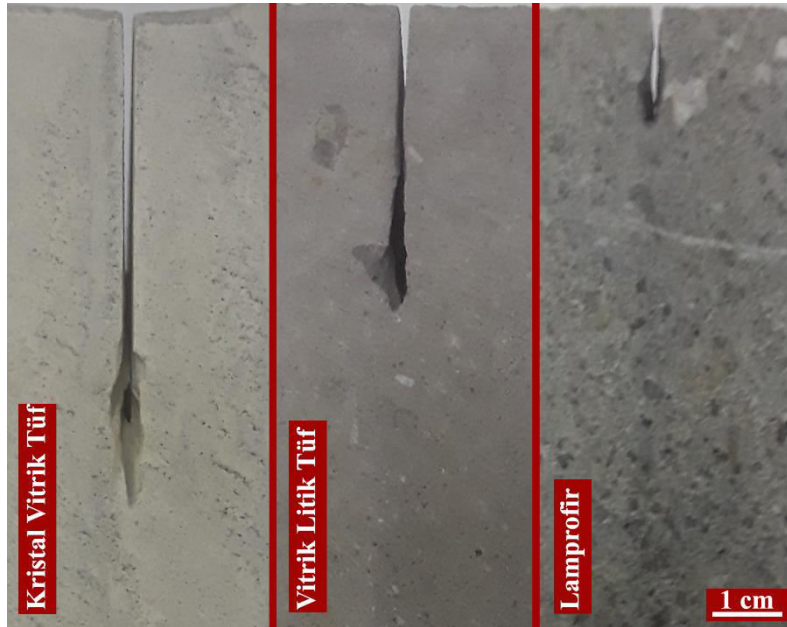


Şekil 54. Granit aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri

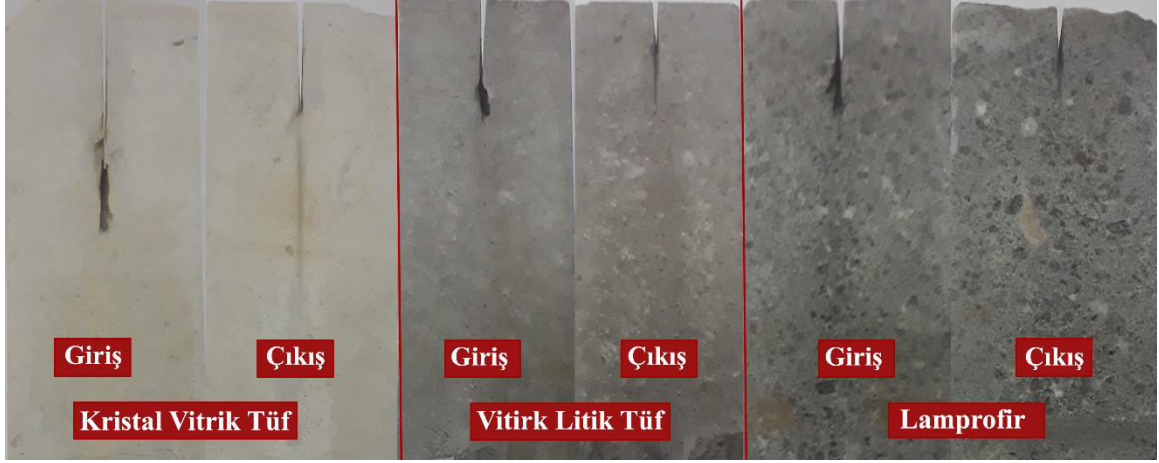
Genel olarak aşındırıcıların sertlikleri ve yoğunluklarının kerf açısını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır (Şekil 58) (Tablo 23). Daha sert ve yüksek yoğunluğa sahip aşındırıcılar iş parçalarını daha derin kestiğinden dolayı (kesme derinliği bölümde de bahsedildiği gibi) daha küçük kerf açıları elde edilmiştir (Aydın vd., 2019a; Khan & Haque).



Şekil 55. Beton aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri



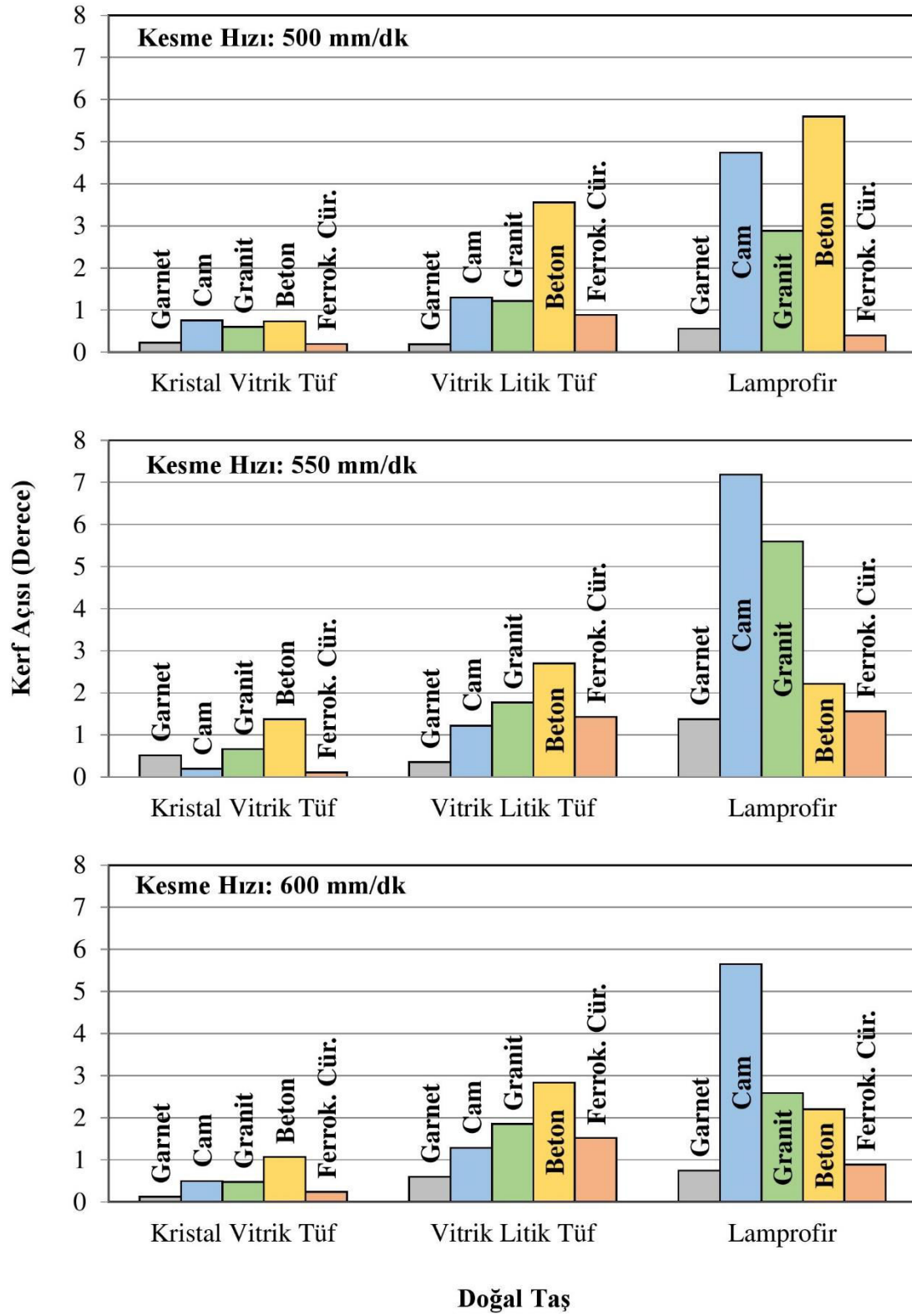
Şekil 56. Ferrochrom cürufu aşındırıcısı ile kesilen iş parçalarının kerf profilleri



Şekil 57. ASJ'nin giriş ve çıkış noktalarında meydana gelen çakılma bölgesinin yapısı

Tablo 23. Kerf açıları (°)

Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Kristal Vitrik Tüf	Vitrik Litik Tüf	Lamprofir
Garnet	500	0,226	0,191	0,555
	550	0,512	0,357	1,373
	600	0,127	0,597	0,745
Cam	500	0,749	1,299	4,740
	550	0,195	1,222	7,186
	600	0,496	1,284	5,649
Granit	500	0,604	1,216	2,882
	550	0,662	1,769	5,594
	600	0,479	1,851	2,585
Beton	500	0,735	3,554	5,596
	550	1,370	2,699	2,213
	600	1,072	2,838	2,205
Ferrokrom Cürufu	500	0,194	0,880	0,393
	550	0,108	1,429	1,558
	600	0,241	1,519	0,889



Şekil 58. Aşındırıcı türüne bağlı olarak farklı ilerleme hızlarında elde edilen kerf açıları

3.6. Kesme Performans Ölçümlerin Arasındaki İlişkiler ve Aşındırıcıların Performansı

Tablo 24’te kesme performansı ölçütlerinin arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir. Buna göre, kesme derinliği, kesme-aşınma derinliği, kesme maksimum ve minimum değerleri ve malzeme uzaklaştırma oranı doğru orantılı çok yüksek bir ilişkide bulunmaktadırlar. Bu özellikler kerf açısı ile de ters yönde orta-yüksek bir ilişkidirler. Yüzey pürüzlülüğü ve kesme genişliği katsayıları ise çok düşük olup kesin bir ilişki bulunmamaktadır. Yüzey pürüzlülüğün çok düşük çıkmasının sebebi ise Lamprofir doğal taşı çoğu aşındırıcılar ile yüksek derinlikle kesilememiştir ve neticesinde yüzey pürüzlülüğü çok yüksek ve bazen hiç alınamamıştır.

Tablo 24. Kesme performans ölçütlerinin birbirleri arasındaki korelasyon katsayıları

Performans Göstergesi	Kesme Derinliği	Kesme-Aşınma Derinliği	Kesme Genişliği	Malzeme Uzaklaştırma Oranı	Yüzey Pürüzlülüğü (R_a)	Kerf Açısı
Kesme Derinliği	1,00	0,93	0,01	0,93	-0,15	-0,67
Kesme-Aşınma Derinliği	0,93	1,00	0,05	0,83	-0,13	-0,57
Kesme Genişliği	0,01	0,05	1,00	0,14	-0,23	-0,08
Malzeme Uzaklaştırma O.	0,93	0,83	0,14	1,00	-0,07	-0,61
Yüzey Pürüzlülüğü- R_a	-0,15	-0,13	-0,23	-0,07	1,00	0,35
Kerf Açısı	-0,67	-0,57	-0,08	-0,61	0,35	1,00

Diğer taraftan bu çalışmada 4 atık nitelikli aşındırıcının kullanılması dışında garnet aşındırıcısı kıyaslamak niyetiyle kullanılmıştır. Farklı hızlarda kullanılan bu aşındırıcılar ve garnet aşındırıcısının performans karşılaştırılması mümkündür. Tablo 25’te performans ölçütlerine göre sıralaması ve Tablo 26’da ise aşındırıcıların garnete göre kesme performansları görülmektedir.

Tablo 26’ya bakıldığında kesme derinliği, kesme-aşınma derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı temelinde garnete en yakın performans ferrokrom cürufu ve cam ile elde

edilmiştir. Tüm aşındırıcıların yüzey pürüzlülüğü ve kesme genişliği açısından sergiledikleri performans birbirine yakındır.

Tablo 25. Aşındırıcıların kesme performans ölçütlerine göre sıralaması

Kesme Hızı (mm/dk)	Aşındırıcılar	Kesme Derinliği	Kesme- Aşınma Derinliği	Kesme Genişliği	Malzeme Uzaklaştırma Oranı	Yüzey Pürüzlülüğü (R _a)	Kerf Açısı
500	Garnet	1	3	11	2	14	1
	Cam	12	12	7	12	8	11
	Granit	6	10	4	13	1	7
	Beton	15	15	1	15	15	15
	Ferrokrom C.	5	7	3	6	6	2
550	Garnet	2	5	5	3	7	4
	Cam	4	9	12	10	2	14
	Granit	10	4	10	11	4	13
	Beton	13	13	9	5	11	10
	Ferrokrom C.	7	6	8	4	3	6
600	Garnet	3	2	13	1	10	3
	Cam	9	11	2	9	9	12
	Granit	11	8	15	8	5	8
	Beton	14	15	14	14	12	9
	Ferrokrom C.	8	1	6	7	13	5

Tablo 26. Aşındırıcıların garnete göre performansları

Kesme Hızı (mm/dk)	Aşındırıcılar	Kesme Derinliği	Kesme-Aşınma Derinliği	Kesme Genişliği	Malzeme Uzaklaştırma Oranı	Yüzey Pürüzlülüğü (R _a)	Kerf Açısı
500	Cam	0,56	0,76	0,97	0,37	0,93	6,98
	Granit	0,64	0,82	0,94	0,35	0,80	4,84
	Beton	0,36	0,63	0,92	0,18	1,13	10,17
	Ferrokrom C.	0,66	0,86	0,94	0,50	0,89	1,51
550	Cam	0,70	0,90	1,06	0,43	0,93	3,84
	Granit	0,64	1,02	1,05	0,40	0,95	3,58
	Beton	0,56	0,80	1,04	0,51	1,03	2,80
	Ferrokrom C.	0,67	0,94	1,04	0,59	0,93	1,38
600	Cam	0,72	0,76	0,92	0,44	1,00	5,06
	Granit	0,67	0,81	1,05	0,46	0,95	3,35
	Beton	0,54	0,62	1,00	0,34	1,03	4,16
	Ferrokrom C.	0,73	1,01	0,96	0,49	1,06	1,80

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu araştırmada, ASJ ile doğal taş kesmede çeşitli atıkların (cam, granit, beton ve ferrokrom cürufu) aşındırıcı olarak kullanılabilirliği irdelenmiştir. Araştırma sonuçlarını aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür

- i. Bu çalışmada, ilerleme hızı, jetin iş parçasından çıkmaması ve kesme derinliğinin ölçülebilmesi için dar bir aralıkta seçilmiştir. Buna rağmen, ilerleme hızındaki değişimin kesme derinliğini etkilediği belirlenmiştir. Genelde yüksek ilerleme hızları için daha düşük kesme derinliklerinin elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır. İlerleme hızının diğer performans çıktılarına etkisi ise tanımlanabilir bir trend sunmamıştır.
- ii. Yoğunluğu ve mekanik dayanımı iyi olan iş parçalarında genel olarak daha düşük kesme derinliği (ayrıca kesme-aşınma derinliği) ve malzeme uzaklaştırma oranının elde edildiği belirlenmiştir. Öte yandan, yüksek sertlik ve yoğunluğa sahip aşındırıcıların kesme derinliği (ayrıca kesme-aşınma derinliği) ve malzeme uzaklaştırma oranını çoğu durumda iyileştirildiği sonucuna ulaşılmıştır. Kesme derinliği, kesme-aşınma derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arasında yüksek korelasyonlu ilişkiler tespit edilmiştir.
- iii. İlerleme hızı, aşındırıcı türü ve iş parçası özelliklerinin kesme genişliğini kayda değer bir şekilde etkilemediği sonucuna ulaşılmıştır.
- iv. Kesme genişliğiyle benzer şekilde, ilerleme hızı, aşındırıcı türü ve iş parçası özellikleriyle yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı ilişkiler elde edilmemiştir. İş parçalarının kesme derinliği arttıkça yüzey kalitesinin düştüğü belirlenmiştir. SEM görüntülerinin analizi sonucunda, dalgalı yüzey profili ile iş parçalarının fiziko-mekanik özelliklerinin ilişki olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, kesme işleminin mikro-sabanlama, çatlama ve süpürerek kesme gibi farklı aşındırma mekanizmalarıyla gerçekleştiği belirlenmiştir.
- v. Düşük dayanım ve sertliğe sahip iş parçalarında genellikle düşük kerf açılarının elde edildiği tespit edilmiştir. Diğer taraftan, aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarının kerf açısı ile genel olarak ters bir ilişki içerisinde olduğu belirlenmiştir. Kerf genişliğinin, kesme derinliğindeki artışa bağlı olarak azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Çakılma bölgesinin, jetin iş parçasına giriş yaptığı tarafta

daha belirgin olduğu gözlenmiştir. Ferrokrom cürufu, granit ve camın garnete yakın performansı sergilediği belirlenmiştir. Bu atıkların ASJ ile doğal taş kesme uygulamalarında aşındırıcı olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

- vi. ASJ kesme uygulamalarında, ilgili atıkların aşındırıcı olarak kullanımıyla çevrenin ve doğal kaynakların korunmasına katkı sağlanacaktır. Ayrıca, kullanılmayan atıklar ekonomiye kazandırılabilir. Bunun yanında, ASJ kesme uygulamalarında maliyet kaleminin önemli bir bölümünü oluşturan aşındırıcı maliyetleri azaltılabilecektir. Bu ise kesilen malzemenin üretim maliyetini etkileyerek ürünün piyasadaki rekabet gücünü arttırabilecektir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- i. Farklı özelliklerde doğal taşlar ya da doğal taş olmayan malzemeler (çelik, alüminyum vd.) üzerinde de atıkların performansı irdelenebilir.
- ii. Atıkların kesme performansları ilerleme hızının geniş aralıklardaki değişimi için analiz edilebilir. Atıkların tane boyutunun kesme performansı üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- iii. Bu çalışma kapsamında sabit tutulan kesme parametrelerinin değişen değerleri için atıkların sergileyeceği performans irdelenebilir.
- iv. Atık bileşiminin (özellikle granit ve beton) kesme performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- v. Atıkların kesme performansının iyileştirilmesine yönelik alternatif yaklaşımlar değerlendirilebilir.

5. KAYNAKLAR

- Agus, M., Bortolussi, A., Careddu, N., Massacci, G., & Grosso, B. (2000). Optimization of Abrasive-workpiece matching, *15th International Conference on Jetting Technology*, Ronneby, Sweden, 171-180.
- Akkurt, A., (2004). Su Jeti ile Kesme Sistemleri ve Uygulama Alanlarının Değerlendirilmesi, *Politeknik Dergisi*, 7(2), 129-139.
- Akkurt, A., Kulekci, M.K., Seker, U. & Ercan, F., (2004). Effect of Feed Rate on Surface Roughness in Abrasive Waterjet Cutting Applications, *Journal of Materials Processing Technology*, 147(3), 389–396.
- Akkurt, A. (2010). Cut Front Geometry Characterization in Cutting Applications of Brass with Abrasive Water Jet, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(4), 599–606.
- Alsoufi, M.S., Suker, D., Alhazmi, M.W. & Azam, S. (2017). Influence of Abrasive Waterjet Machining Parameters on the Surface Texture Quality of Carrara Marble, *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 7(2), 25-37.
- Altaş, Z. (2006). Üçtepeler (Bünyan-Kayseri) Traverten Ocağının İncelenmesi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.
- Arıkan, M. (1968). Mermer ve Mermercilik, Ankara Basım ve Ciltevi, 187 s.
- Arola, D. & Ramulu, M. (1994). The Influence of Abrasive Waterjet Cutting Conditions on the Surface Quality of Graphite/ Epoxy Laminates, *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 34(3), 295-313.
- Arola, D. & Ramulu, M. (1996). A Study of Kerf Characteristics in Abrasive Waterjet Machining of Graphite/Epoxy Composite, *Transaction of the ASME*, 118.
- ASTM. (2016). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer D854-14.
- ASTM. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Dimension Stone, C880/C880M-15.
- 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 Waterjet, *Journal of Central South University*, 22(3), 1055-1061.

- Aydın, G., Karakurt, İ. & Aydın, K. (2010). Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Çalışma Parametrelerinin Granit Kerf Açısına Etkisinin Araştırılması, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 49(2), 17-26.
- Aydın, G., Karakurt, İ. & 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. & 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, I. & Aydın, K. (2013a). Investigation of the Surface Roughness Of Rocks Sawn by Diamond Sawblades. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 61, 171–182.
- Aydın, G., Karakurt, İ. & Aydın, K. (2013b). Prediction of Cut Depth of the Granitic Rocks Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(5), 1223-1235.
- Aydın, G., Karakurt, I. & Hamzaçebi, C. (2014). Artificial Neural Network and Regression Models for Performance Prediction of Abrasive Waterjet in Rock Cutting, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 1321-1330.
- Aydın, G., Kaya, S. & Karakurt, İ. (2017). Utilization of Solid-Cutting Waste of Granite as an Alternative Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting of Marble, *Journal of Cleaner Production*, 159, 241-247.
- Aydın, G., Kaya, S. & Karakurt, İ. (2019a). Effect of Abrasive Type on Marble Cutting Performance of Abrasive Waterjet, *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 357.
- Aydın, G., Kaya, S., Karakurt, İ. & Yıldırım, F. (2019b). Aşındırıcılı Sujetiyle Doğaltaş Kesmede Granit Atıklarının Aşındırıcı Olarak Değerlendirilmesi, *Madencilik*, 58(3), 211-218.
- Aydın, G. & Karakurt, İ. (2020). Doğaltaş Üretim ve İşleme Atıklarının Değerlendirilmesi, *ALKU Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 62-67.
- Aydın, G., Karakurt, İ., Amiri, M.R. & Kaya, S. (2022). Improvement of Rock Cutting Performance Through Two-Pass Abrasive Waterjet Cutting, *Sustainability 2022 Journal*, 14, 12704.
- Babu, M.K. & Chetty, O.V.K. (2003). A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining, *Wear*, 254(7-8), 763-773.
- Başığit, M. (2012). Su Jeti ile Kayaçların Yüzey İşleminde Optimum Çalışma Koşullarının Belirlenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Chen, F.L. & Siores, E. (2003). The Effect of Cutting Jet Variation on Striation Formation in Abrasive Water Jet Cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, 135(1), 1–5.
- Chen, F.L., Siores, E. & Patel, K. (2002). Improving the Cut Surface Qualities Using Different Controlled Nozzle Oscillation Techniques, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42(6), 717-722.
- Coşansu, G. (2010). Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Kolemanit Tozunun Aşındırıcı Olarak Kullanılmasının DeneySEL İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Coşansu, G. & Cogun, C. (2012). An Investigation on Use of Colemanite Powder as Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting (AWJC), *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8), 2371-2380.
- Çelik, M. Y. & Kavuşan, G. (2001). Doğal Taş ve Mermerlere Uygulanan Yüzey Şekillendirme Teknikleri, 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 77-86, İzmir, Türkiye.
- Çobanoğlu, Ö.C. (2004). Elâzığ Ferrookrom Cürufunun Betonun Çarpma Dayanımı Üzerine Etkilerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elâzığ.
- Değerli, B. (2015). Peyzaj Tasarımında Kullanılan Doğal Taşların Fiziksel ve Petrografik Özelliklerinin, Hiperspektral Yansıma Özellikleriyle Karşılaştırılması, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Samsun.
- Demir, İ. (2009). İnşaat Yıkıntı Atıklarının Beton Üretiminde Kullanımı ve Beton Özelliklerine Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 9(2), 105-114.
- Demir, D. (2022). Atık Cam Tozu Kullanılarak Üretilen Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Çeşitli Kür Koşulları Altında Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Engin, İ. C. (2006). Bazı Türk Mermerlerinin Aşındırıcı Su Demeti ile Kesilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- Engin, İ, C. (2012). A Correlation for Predicting the Abrasive Water Jet Cutting Depth for Natural Stones, *South African Journal of Science*, 108(9/10).
- EPA (Environmental Protection Agency). (2019). Advancing Sustainable Materials Management: 2017 Fact Sheet Assessing Trends in Material Generation, Recycling, Composting, Combustion with Energy Recovery and Landfilling in the United States.
- Erdoğan, S.T. (2011). Öğütülmüş Ferrookrom Cürufu Kullanılarak Jeopolimer Üretimi, Conference Paper.

- Fowler, G., Shipway, P.H. & Pashby, I.R. (2005). A Technical Note on Grit Embedment Following Abrasive Water-jet Milling of a Titanium Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 356-368.
- Fowler, G., Pashby, I.R. & Shipway, P.H. (2009). The Effect of Particle Hardness and Shape When Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V, *Wear*, 266, 613-620.
- Gökçe, Ahmet. (2000). Maden Yatakları 2. Baskı, Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, 85, 335.
- Gupta, V., Garg, P., M, Batra, K., M. & Khanna, R. (2013). Analysis of Kerf Taper Angle in Abrasive Water Jet Cutting of Makrana White Marble, *Asian Journal of Engineering and Applied Technology*, 2(2), 35-39.
- Gülaçtı, S. & Durak, E. (2019). Beş Eksenli Köprü Tipi CNC Mermer İşleme Makinesi Tasarımı ve İmalatı, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 282-293.
- Hassan, A.I. & Kosmol, J. (1997). An Overview of Abrasive Waterjet Machining (AWJM), *Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice*, 181-205.
- Hasçalık, A., Çaydaş, U. & Gürün, H. (2007). Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining of Ti-6Al-4V Alloy, *Material & Design*, 28(6), 1953-1957.
- Hashish, M. (1984). A Modeling Study of Metal Cutting with Abrasive Waterjets, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(1), 88-100.
- Hashish, M. (1988). Visualization of the abrasive waterjet cutting process, *Journal of Experimental Mechanics*, 28, 159-169.
- Hashish, M. (1989). A Model for Abrasive-Waterjet (AWJ) Machining, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 111(2), 154-162.
- Hashish, M. (1995). Material Properties in Abrasive-waterjet Machining, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 117, 578-583.
- Hashish, M. & Du Plessis, M.P. (1979). Prediction Equations Relating High Velocity Jet Cutting Performance to Standoff Distance and Multiphases, *Journal of Engineering for Industry*, 101, 311-318.
- ISRM (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006, Ulusay R., Hudson, A.J. (eds.), Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara.
- Jankovic, P., Radovanovic, M., & Baralic, J. (2011). Abrasive Material for Abrasive Water Jet Cutting and Their Influence on Cut Surface Quality, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tribology*, 99-102.

- Kabilan, N. & Muttharam, M. (2016). Correlation Between Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength for Jointed Rocks, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5(5), 157-161.
- Karakurt, İ. (2007). Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinin Kayaç Kesme Performanslarının Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Karakurt, İ. (2011). Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile Kayaç Kesmede Parametrik Değişimlerin ve Malzeme Dokusal Özelliklerinin Kesme Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Karakurt, I., Aydın, G. & Aydiner, K. (2010). Optimization of Process Parameters for Surface Roughness of The Granite in Abrasive Waterjet Cutting. *Proc., 10th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM2010), Surveying Geology and Mining Ecology Management*, 1, 499–506, Sofia, Bulgaria.
- Karakurt, İ., Aydın, G. & Aydiner, K. (2011a). A Machinability Study of Granite Using Abrasive Waterjet Cutting Technology, *Gazi University Journal of Science*, 24(1), 143-151.
- Karakurt, İ., Aydın, G. & Aydiner, K. (2011b). Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 18(6), 435-442.
- Karakurt, İ., Aydın, G. & Aydiner, K. (2012a). An Experimental Study on the Depth of Cut of Granite in Abrasive Waterjet Cutting, *Materials and Manufacturing Processes*, 27(5), 538-544.
- Karakurt, İ., Aydın, G. & Aydiner, K. (2012b). 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, I., Aydın, G. & Aydiner, K. (2014). An Investigation on the Kerf Width in Abrasive Waterjet Cutting of Granitic Rocks, *Arabian Journal of Geosciences*, 7(7), 2923-2932.
- Kaya, S. (2016). Su Jetiyle Kayaç Kesmede Çeşitli Aşındırıcıların Kullanımı, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Kaya, S. (2022). Aşındırıcılı Su Jeti ile Doğal Taş Kesmede Alternatif Aşındırıcıların Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Khan, A.A. & Haque, M.M. (2007). Performance of Different Abrasive Materials During Abrasive Water Jet Machining of Glass. *Journal of Material Process and Technology*, 191, 404–407.

- Kokarcalı, U. & Köksal, M. (2022). Türkiye’de Doğal Taş Sektörü İhracatını Etkileyen Makroekonomik Faktörler, *Journal of Technology and Applied Sciences*, 4(2), 183-198.
- Konig, W. & Wulf, C. (1984). The Influence of the Cutting Parameters on Jet Forces and the Geometry of the Kerf, *The Seventh International Symposium on Jet Cutting Technology*, 179-191, Ottawa, Canada.
- Kulaksız, S. (2012). Doğal Taş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, 3. Baskı, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları*, 636, Ankara.
- Momber, A.W. & Kovacevic, R. (1998). Principles of Abrasive Waterjet Machining, *Springer – Verlag London Limited*, USA.
- Momber, A.W. & Kovacevic, R. (2000). Particle-Size Distribution Influence in High-Speed Erosion of Aluminum, *Particulate Science and Technology*, 18(3), 199-212.
- Natarajan, Y., Murugesan, P.K., Mohan, M. & Khan S.A.L. (2020). Abrasive Water Jet Machining Process: A State of Art of Review, *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 271-322.
- Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). Makine Teknolojisi, Malzeme ve Isıl İşlemler, Ankara.
- Momber, A. W. (1998). The Kinetic Energy of Wear Particles Generated by Abrasive–Water-Jet Erosion. *Journal of Materials Processing Technology*, 83(1-3), 121-126.
- MTA Genel Müdürlüğü (2018). Dünyada ve Türkiye’de Doğal Taşlar, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
- Murphy, J. (2001). Additives for Plastics Handbook, *Elsevier*, ISBN 9780080498614.
- Nazir, R., Momeni, E., Armaghani, D.J. & Mohd, M.F. (2013). Correlation Between Unconfined Compressive Strength and Indirect Tensile Strength of Limestone Rock Samples, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, 1737-1746.
- Niranjan, C.A., Srinivas, S. & Ramachandra, M. (2018). Effect of Process Parameters on Depth of Penetration and Topography of AZ91 Magnesium Alloy in Abrasive Water Jet Cutting, *Journal of Magnesium and Alloys*, 6, 366-374.
- Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L. & Ryffel, H. H. (2004). 27th Machinery’s Handbook, *Industrial Press Inc.*, 724-737, New York.
- Oh, T. M. & Cho, G. C. (2014). Characterization of Effective Parameters in Abrasive Waterjet Rock Cutting, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47, 745-756.
- Ohman, J. L. (1993). Abrasives: Their characteristics and effect on waterjet cutting, *Proceedings of the 7th American Waterjet Conference*, 351-362, Amerika Birleşik Devletleri.

- Onargan, T., Köse, H. & Deliormanlı, A.H. (2006). Mermer, 4. Baskı, *TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları*, Ankara, 324.
- Ozuloğul A. & Erdoğan, M. (1995). Mermerlerde Yüzey Parlaklığını Görüntü Analiz Yöntemi ile Ölçülmesi, Türkiye 1. Mermer Sempozyumu, 37-44, Afyon.
- Perotti, F., Annoni, M., Calcante, A., Monno, M., Mussi, V. & Oberti, R. (2021). Experimental Study of Abrasive Waterjet Cutting for Managing Residues in No-Tillage Techniques, *Agriculture*, 5, 392.
- Saeed, S.B.H. & Alshkane, Y.M. (2018). Effect of Freezing and Thawing on Physical and Mechanical Properties of Sedimentary Rock, *Journal of Garmian University*, 5(2), 155-172.
- Santhanakumar, M. (2018). Simultaneous Optimization of Multiple Responses in Abrasive Waterjet Cutting Process, Anna University, Faculty of Mechanical Engineering, Doktora Tezi, Chennai, India.
- Schüler, M., Dadgar, M., Herrig, T., Klink, A. & Bergs, T. (2021). Experimental Investigation of Abrasive Properties in Waterjet Machining, *Procedia CIRP*, 101, 210-213.
- Siores, E., Wong, W.C.K., Chen, L. & Wager, J.G. (1996). Enhancing Abrasive Waterjet Cutting of Ceramics by Head Oscillation Techniques, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 45(1), 327-330.
- Summers, D. A. (2003). *Waterjetting technology*. CRC Press.
- Ticaret Bakanlığı. (2021). *Doğal Taşlar Sektör Raporu*, İhracat Genel Müdürlüğü, Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, 10.
- Topçu, I.B. & Canbaz, M. (2004). Properties of Concrete Containing Waste Glass. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267-274.
- Tosun, N., Dağtekin, I., Özler, L., & Deniz, A. (2013). Abrasive Waterjet Cutting of Aluminum Alloys: Workpiece Surface Roughness, *Applied Mechanics and Materials*, 404(1), 3-9.
- URL-1, (2023, Eylül 09). 2020 Yılı Maden Dış Ticaret raporu <https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/bilgi-merkezi/turkiyede-madencilik/2020-yili-maden-dis-ticaret.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-2, (2023, Haziran 12). Plaka Silim Makinesinin bilgileri <https://www.toksel.com.tr/urunler/plaka-cila> adresinden alınmıştır.
- URL-3, (2023, Mayıs 05). Kerf genişliği bilgileri <https://www.finepart.com/waterjet-cutter/waterjet-kerf-angle/> adresinden alınmıştır.

- URL-4, (2023, Nisan 15). Granitin Mohs sertliği <https://rskmarbleandgranite.com/granite-mohs-scale/> adresinden alınmıştır.
- URL-5, (2023, Nisan 15). Betonun Mohs sertliği <https://www.concretedecor.net/departments/tools-and-equipment/make-tooling-choices-easier-with-the-mohs-hardness-test-kit/> adresinden alınmıştır.
- Wang, J. (1999). A Machinability Study of Polymer Matrix Composites Using Abrasive Waterjet Cutting Technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 94, 30–35.
- Wang, J. & Wong, W.C.K. (1999). A Study of Abrasive Waterjet Cutting of Metallic Coated Sheet Steels, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39(6), 855-870.
- Wang, J. & Guo, D.M. (2003). The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, 133(3), 371-377.
- Xiao, S., Ren, Q., Cheng, Y., Zhao, H., Cao, S., Zhang, L., Chen, B. & Meng, X. (2021). Damage and Fracture Characteristics of Rocks with Different Structures Under High-velocity Water Jet Impact, *Engineering Fracture Mechanics*, 256, 107961.
- Yurdakul, M., Gopalakrishnan, K. & Akdas, H. (2014). Prediction of Specific Cutting Energy in Natural Stone Cutting Processes Using the Neuro-Fuzzy Methodology, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 67, 127-135.
- Zaremba, D., Heese, P., Bauer, M., Maier, H.J. & Hassel, T. (2015). Particle Disintegration in the Abrasive Water Injection Jet. *WJTA-IMCA Conference and Expo*, November 2–4, New Orleans, Louisiana.
- Zhang, S., Wu, Y., & Wang, Y. (2011). An Investigation of Surface Quality Cut by Abrasive Water Jet, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 5(1), 166–177.

6. EKLER

Ek Tablo 1. Kristal Vitrik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	104,3	101,26	93,37	102	95,94	101	79,42	69,24
11		550	76,64	85,44	89,55	86,26	96,94	86,27	116,44	97,64
12		600	86,59	82	78,56	71,46	72	81,38	91,28	81
1	Cam	500	68,9	64,65	57	61,06	57,77	52,14	34,68	27,77
2		550	73,95	68,5	85,57	76,6	60,63	61,7	82,3	82,7
3		600	66,65	66,64	63,6	77	67,25	68,32	76,26	75,7
4	Granit	500	70	65,46	62,69	60,75	65,91	69,18	65,81	63,54
5		550	64,57	75,52	67,36	61,47	65,09	56,21	67,66	62,08
6		600	60,07	64,33	65,33	67	53,27	62,12	66,26	67,45
7	Beton	500	58,96	50,65	53,28	54,77	46,28	40,65	39,43	33,22
8		550	80,74	68,87	62,72	58,55	79,25	65	25,52	46,85
9		600	55,85	52,48	56,09	66,04	63,96	62,6	24,06	20,65
13	Ferrokrom Cürufu	500	83,9	69,66	67,16	65,9	56,77	72,22	70,51	59,69
14		550	65,89	72,4	60,6	88,2	79	63,5	59,43	58,48
15		600	62,41	73,68	80,12	74,93	70,05	59,31	51,05	77,87

Ek Tablo 2. Vitrik Litik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen tüm kesme derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	52	53,7	50,15	41,77	42,59	44,65	44,42	40,35
11		550	36,15	45,87	47,96	46,02	46,54	39,61	41,06	35,91
12		600	43,97	45,59	46,48	48,76	42,9	36,41	37,5	34,26
1	Cam	500	38,14	34,37	37,59	40,06	33	35,76	35,13	30,86
2		550	36	32,46	30,29	29,84	33,41	27,97	28,26	26,34
3		600	31,59	28,32	34,1	31,7	28	29,27	26	23,62
4	Granit	500	38,92	30,12	36	29,9	27	28,77	28,9	30,62

Ek Tablo 2'nin devamı

5	Granit	550	33,33	26,6	26,6	33,9	30,13	25	25,15	28,02
6		600	32,07	26,07	29	27,01	27,29	23,61	24,7	17,8
7	Beton	500	15,31	11,74	12,85	12,32	10,91	11,53	9,68	10,75
8		550	28,68	23,22	18,5	24,8	23,34	20	22,12	21,5
9		600	22,57	22,69	26,37	22,49	18,7	24,36	20,96	18,16
13	Ferrokrom	500	39,27	35,34	34,47	32,44	30,6	32,93	34,88	36,77
14	Cürufu	550	42,75	38,28	29,82	30,5	32,7	27,35	30,64	6,46
15		600	33,25	36,29	31,84	27,68	27,31	27,03	21,98	29,77

Ek Tablo 3. Lamprofir için 2 cm aralıklarla ölçülen tüm kesme derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	28,68	41,84	35,41	26,85	36,87	41,07	35,21	27,3
11		550	31,18	25,84	28,9	32,21	31,68	31,85	30	34,75
12		600	22,53	29,08	24,75	36,83	31,37	20,49	25,9	28,88
1	Cam	500	8,66	6,06	6,45	9,57	12,25	9,68	8,53	10,64
2		550	13,03	11,28	11,18	6,96	10,88	9,64	10,29	11,06
3		600	7,15	12,73	12,86	7,17	10,47	6,98	9,1	9,06
4	Granit	500	15,96	14,43	15,83	14,9	17,07	14,58	13,42	14,86
5		550	15,59	11,76	12,2	10,78	8,15	13,5	12,62	5,9
6		600	10,86	7,83	13	16,5	8,89	9,09	10,75	10,85
7	Beton	500	3,21	2,18	3,25	4,88	2,12	3,21	2,12	1,82
8		550	13,77	8,27	5	5,68	6,92	10,38	11,58	8,24
9		600	13,7	10,18	4,1	8,29	10,98	10,85	6,45	4,84
13	Ferrokrom Cürufu	500	4,81	14,36	12,83	15,13	11,89	5,43	10,76	15,73
14		550	19,37	19,11	13,18	9,22	4,92	18,87	15,31	4,8
15		600	15,48	11,67	13,99	14,81	6,42	9,24	9,34	10,35

Ek Tablo 4. Kristal Vitrik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme-aşınma derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	26,62	35,41	31,39	32,56	34,36	29,28	28,87	24,21
11		550	29,48	20	26,15	32,73	27,3	26,48	21,7	29,86
12		600	26,96	33,19	32,61	33,25	33,8	30,17	29,13	25,84
1	Cam	500	23,5	26,58	21,33	40,08	22,65	19,9	20,41	12,1
2		550	24,2	24,6	27,3	29,2	28,43	24,85	29,85	28,84
3		600	20,84	25,5	32,63	28,81	28	26,27	26,67	27,11
4	Granit	500	24,31	28,54	34,88	28,83	27,73	28,87	29,94	29,65
5		550	33,58	39	32	36,16	29,76	31,73	29,35	28,38
6		600	24,65	27,55	31,56	29,14	30,7	25,4	26,22	25,6
7	Beton	500	30,2	21,01	28,5	31,69	27,67	29,42	16,97	13,95
8		550	28,83	32,63	29,94	28,65	30,87	28,74	23,8	24,55
9		600	23,66	21,56	28,86	25,76	28,37	24,61	13,34	9,98
13	Ferrokrom Cürufu	500	28,8	25,38	26,33	27,22	24,18	23,16	23,78	19,95
14		550	40,54	31,46	30,55	33,84	28,9	28,6	25,05	28,6
15		600	29,17	31,07	47,1	33,8	46,82	31,44	33,37	44,5

Ek Tablo 5. Vitrik Litik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme-aşınma derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	12,37	10	11,3	8,9	9	8,36	8,6	5,3
11		550	14,76	14,27	14,12	11,82	12,07	8,92	8,11	6,46
12		600	16,56	15,51	14,7	14,2	13	11,17	10,5	10,2
1	Cam	500	8,43	11,61	10,85	11,59	9,96	11	10,59	9,41
2		550	10	11,66	12,48	10,1	11,43	9,44	8,27	7,16
3		600	8,56	5,59	7,47	9,9	7,63	7,68	7,8	8,5
4	Granit	500	6,79	6,63	9	7,68	6,85	6,9	5,94	5,6
5		550	9,08	7,29	6,88	6,78	6,67	6,3	7,16	5,27
6		600	10	11,42	11,2	9,6	8,8	7	9,48	7,92
7	Beton	500	5,65	5	4,66	4,15	4	6,75	4,41	3

Ek Tablo 5'in devamı

8	Beton	550	5,26	6,4	6,25	5	5,36	5,31	5,43	5
9		600	8	7,46	7,33	6,79	6,08	6,56	5,67	6,8
13	Ferrokrom	500	19,91	19,06	16,46	12,72	12,44	12,5	11	9,35
14	Cürufu	550	11,16	11,32	9,32	10,1	8,9	7,15	6,36	3,35
15		600	9,55	9,94	10,4	9	8,1	6,8	6,78	5,71

Ek Tablo 6. Lamprofir için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme-aşınma derinliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	9,2	8,14	8,48	9,16	10,82	9,03	11,93	8,68
11		550	9,68	4,42	7,42	7,2	7,01	7,46	7,47	7,5
12		600	7,58	7,77	6,2	7,62	6,51	5,62	5,84	8,57
1	Cam	500	1,81	2,88	4,04	4,41	3,55	2,54	4,48	3,41
2		550	4,33	3,27	4,03	3,73	3,54	3,18	2,96	3,33
3		600	3,05	5,39	5,15	2,84	3,7	3,61	3,31	4,23
4	Granit	500	4,64	5,15	4,19	3,8	3,6	5,15	4,45	3,5
5		550	12,63	6,65	6,57	5,39	4,59	7,02	7,52	3,06
6		600	4,8	4,77	3,86	4,78	4,33	4,72	3,91	3,48
7	Beton	500	-	-	-	-	-	-	-	-
8		550	2,32	2,15	2,27	2,22	1,89	2,75	2,68	2,33
9		600	3,5	3,03	1,9	2,38	2,95	2,95	2,59	2,25
13	Ferrokrom Cürufu	500	3,06	2,63	2,86	2,83	2,6	2,9	3,09	3
14		550	3,27	3,74	3,35	3,56	2,27	3,7	2,66	3,25
15		600	3,71	7,77	7,12	7,66	4,8	4,22	5,5	5,7

Ek Tablo 7. Kristal Vitrik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme genişliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	1,49	1,49	1,62	1,68	1,67	1,67	1,59	1,59
11		550	1,41	1,41	1,41	1,43	1,45	1,46	1,45	1,45
12		600	1,6	1,61	1,61	1,62	1,62	1,55	1,55	1,53

Ek Tablo 7'nin devamı

1		500	1,51	1,45	1,42	1,38	1,36	1,36	1,35	1,35
2	Cam	550	1,42	1,54	1,51	1,51	1,49	1,49	1,48	1,29
3		600	1,39	1,47	1,47	1,47	1,46	1,46	1,46	1,48
4		500	1,53	1,53	1,53	1,54	1,55	1,54	1,54	1,54
5	Granit	550	1,55	1,55	1,55	1,55	1,48	1,42	1,41	1,59
6		600	1,65	1,79	1,8	1,79	1,79	1,76	1,73	1,71
7		500	1,47	1,48	1,5	1,5	1,5	1,46	1,44	1,41
8	Beton	550	1,93	1,78	1,78	1,78	1,78	1,74	1,67	1,66
9		600	1,5	1,7	1,73	1,71	1,7	1,7	1,5	1,49
13		500	1,66	1,66	1,55	1,56	1,5	1,49	1,49	1,49
14	Ferrokrom	550	1,37	1,53	1,52	1,6	1,6	1,56	1,56	1,56
15	Cürufu	600	1,49	1,47	1,47	1,47	1,42	1,43	1,44	1,44

Ek Tablo 8. Vitrik Litik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme genişliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10		500	1,63	1,82	1,6	1,6	1,55	1,56	1,51	1,51
11	Garnet	550	1,57	1,58	1,66	1,65	1,66	1,66	1,51	1,51
12		600	1,8	1,85	1,82	1,82	1,82	1,87	1,87	1,87
1		500	1,8	1,8	1,72	1,69	1,69	1,64	1,64	1,62
2	Cam	550	1,85	1,88	1,86	1,86	1,66	1,54	1,54	1,55
3		600	1,36	1,37	1,41	1,45	1,45	1,45	1,45	1,45
4		500	1,48	1,48	1,48	1,47	1,47	1,48	1,49	1,49
5	Granit	550	1,77	1,8	1,96	1,73	1,68	1,66	1,66	1,65
6		600	1,73	1,73	1,74	1,74	1,69	1,68	1,69	1,66
7		500	1,36	1,49	1,5	1,52	1,54	1,55	1,56	1,56
8	Beton	550	1,46	1,46	1,5	1,49	1,49	1,52	1,48	1,57
9		600	1,86	1,67	1,5	1,49	1,5	1,78	1,78	1,78
13		500	1,55	1,55	1,56	1,56	1,53	1,52	1,52	1,42
14	Ferrokrom	550	1,87	1,87	1,84	1,83	1,83	1,62	1,62	1,62
15	Cürufu	600	1,61	1,61	1,61	1,57	1,57	1,57	1,6	1,6

Ek Tablo 9. Lamprofir için 2 cm aralıklarla ölçülen kesme genişliği (mm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	1,47	1,47	1,47	1,58	1,61	1,66	1,61	1,51
11		550	1,51	1,51	1,44	1,44	1,44	1,46	1,5	1,41
12		600	1,51	1,44	1,32	1,32	1,31	1,32	1,38	1,4
1	Cam	500	1,54	1,54	1,37	1,36	1,63	1,41	1,55	1,74
2		550	1,7	1,7	1,57	1,56	1,56	1,58	1,49	1,48
3		600	1,6	1,61	1,43	1,47	1,6	1,54	1,55	1,56
4	Granit	500	1,41	1,41	1,41	1,47	1,47	1,53	1,41	1,45
5		550	1,47	1,49	1,32	1,52	1,49	1,38	1,5	1,7
6		600	1,55	1,55	1,6	1,6	1,62	1,74	1,69	1,47
7	Beton	500	1,27	1,34	1,52	1,52	1,51	1,39	1,32	1,31
8		550	1,39	1,4	1,35	1,38	1,36	1,43	1,44	1,57
9		600	1,57	1,53	1,47	1,44	1,44	1,71	1,54	1,47
13	Ferrokrom Cürufu	500	1,34	1,38	1,4	1,43	1,39	1,38	1,37	1,37
14		550	1,46	1,35	1,36	1,36	1,36	1,36	1,36	1,37
15		600	1,57	1,56	1,56	1,54	1,54	1,54	1,57	1,6

Ek Tablo 10. Kristal Vitrik Tuf için 2 cm aralıklarla ölçülen yüzey pürüzlülüğü-R_a (µm)
(ölçme derinliği: 1 cm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	9,34	7,25	9,84	9,84	8,55	7,72	8,30	8,64
11		550	7,88	9,56	9,55	9,53	8,14	9,31	9,45	7,63
12		600	9,43	11,36	7,89	7,63	9,06	6,47	8,04	7,08
1	Cam	500	9,41	9,85	8,59	8,09	7,85	7,35	8,53	10,55
2		550	8,53	10,72	6,09	6,67	7,02	7,73	7,35	5,76
3		600	8,25	7,34	6,96	10,60	8,22	8,83	8,48	9,15
4	Granit	500	6,02	6,52	6,21	8,02	6,30	6,10	6,40	7,58
5		550	8,28	6,71	6,99	8,22	8,83	7,60	7,64	7,99
6		600	6,95	9,48	7,50	9,28	8,28	8,57	8,59	8,13
7	Beton	500	11,01	8,82	9,16	8,93	10,87	9,96	6,92	8,93

Ek Tablo 10'un devamı

8	Beton	550	10,11	10,34	10,67	8,43	5,57	5,83	6,69	8,95
9		600	11,42	10,03	6,25	7,07	9,79	7,25	-	-
13	Ferrokrom Cürufu	500	9,69	6,69	9,39	6,91	9,59	7,01	9,57	9,10
14		550	9,57	11,11	6,02	7,00	7,06	10,02	6,78	7,33
15		600	9,56	7,76	8,63	6,50	7,79	8,05	9,39	8,01

Ek Tablo 11. Vitrik Litik Tüf için 2 cm aralıklarla ölçülen yüzey pürüzlülüğü-R_a (μm)
(ölçme derinliği: 1 cm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	7,83	12,23	9,62	11,00	7,49	8,29	7,16	9,58
11		550	9,19	6,86	7,98	6,20	9,11	7,29	7,22	6,74
12		600	8,27	7,33	7,62	8,85	10,09	8,78	8,28	6,35
1	Cam	500	5,89	7,58	6,82	7,26	9,65	7,47	8,70	8,58
2		550	7,86	6,46	8,95	8,03	8,63	9,03	7,07	6,32
3		600	9,42	7,88	7,63	9,60	9,23	7,10	7,11	6,54
4	Granit	500	6,59	9,44	6,84	9,10	6,65	8,57	7,32	5,84
5		550	6,74	10,02	6,82	7,41	9,64	7,78	8,01	6,71
6		600	6,58	7,26	8,56	7,05	7,95	10,10	5,78	6,12
7	Beton	500	11,29	9,69	9,21	10,42	-	13,16	-	-
8		550	12,59	8,42	5,55	8,83	9,36	7,42	6,65	9,73
9		600	9,56	8,12	10,63	12,39	5,53	6,53	7,26	8,02
13	Ferrokrom Cürufu	500	8,78	6,50	6,32	6,79	7,13	7,69	9,17	6,86
14		550	7,64	7,26	7,96	6,53	8,03	6,32	6,57	-
15		600	9,00	8,62	8,62	7,15	8,49	10,48	11,70	10,61

Ek Tablo 12. Lamprofir için 2 cm aralıklarla ölçülen yüzey pürüzlülüğü-R_a (μm) (ölçme derinliği: 1 cm)

Numune No	Aşındırıcı	İlerleme Hızı (mm/dk)	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm 5	Ölçüm 6	Ölçüm 7	Ölçüm 8
10	Garnet	500	9,25	7,13	6,03	8,75	6,53	9,10	7,09	6,47
11		550	4,84	7,59	8,13	7,45	11,33	7,15	7,05	8,71

Ek Tablo 12'nin devamı

12	Garnet	600	8,74	9,28	9,72	-	7,87	-	6,52	4,59
1		500	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Cam	550	-	-	-	-	-	-	-	-
3		600	-	-	-	-	-	-	-	-
4		500	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Granit	550	-	-	-	-	-	-	-	-
6		600	-	10,55	-	-	8,28	-	7,41	9,90
7		500	-	-	-	-	-	-	-	-
8	Beton	550	-	-	-	-	-	-	-	-
9		600	-	-	-	-	-	-	-	-
13		500	-	-	-	-	-	-	-	-
14	Ferrokrom	550	11,69	-	-	-	-	10,15	8,92	-
15	Cürufu	600	-	-	-	-	-	-	-	-

Ek Tablo 13. Doğal taşların bütün fiziksel özellikleri

Doğal taş	Su emme kapasitesi (%)	Efektif su emme (%)	Doğal su içeriği (%)	Doyma derecesi (%)	Kuru yoğunluk (gr/cm ³)	Doymuş yoğunluk (gr/cm ³)	Tabii yoğunluk (gr/cm ³)	Mineral tane yoğunluğu (gr/cm ³)	Efektif porozite (%)	Toplam porozite (%)	Boşluk oranı (%)
Kristal Vitrik Tüf	12,27	7,67	3,66	29,80	1,63	1,83	1,69	2,04	20,00	20,00	24,99
Vitrik Litik Tüf	6,07	5,46	0,28	4,57	1,99	2,11	2,00	2,27	12,09	12,09	13,76
Lamprofir	2,88	1,24	1,60	55,62	2,43	2,50	2,47	2,61	7,00	7,00	7,53

ÖZGEÇMİŞ

Mohammad Reza AMIRI, Lise eğitimini Belh'te tamamladı. 2012 yılında Belh Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2013'de T.C. Türkiye Bursları programından faydalanarak Süleyman Demirel Üniversitesi Maden Bölümü Yüksek Lisans programına kaydoldu. 2016'da ilgili programdan Yüksek Maden Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Afganistan'a dönerek Belh Üniversitesi'nde Petrol Mühendisliği Bölüm Başkanı olarak çalışmaya başladı. 2018'de üniversitesi tarafından görevlendirmeli olarak ve tekrar T.C. Türkiye Bursları programından faydalanarak Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Doktora eğitimine başladı. Halen ilgili bölümde doktora eğitimini sürdürmekte olan Amiri Farsça, İngilizce ve Almanca bilmektedir.