Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi
38(2), 609-628, 2026

Araştırma Makalesi
https://doi.org/10.35234/fumbd.1971546

Doğaltaşların Aşındırıcılı Sujeti ile İleri Açılı ve Çok Geçişli Kesiminde Kerf Geometrisinin Gelişimi: Kerf Genişliği ve Kerf Açısı Üzerine Deneysel Bulgular

Imene ROGAI [1,2,3], İzzet KARAKURT [1,4,*], Gökhan AYDIN [1,5], Büşra DEMİR AVCI [1,2,6]

[1] Madencilik&Enerji Araştırma Grubu, Maden Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ortahisar/Trabzon, Türkiye

[2] Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Ortahisar/Trabzon, Türkiye

[3] imenerogai@ktu.edu.tr, [*,4] karakurt@ktu.edu.tr, [5] gaydin@ktu.edu.tr, [6] busrademiravci@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 15/06/2026; Kabul/Accepted: 22/09/2026)

Öz: Bu çalışmada, doğal taşların aşındırıcılı su jeti (ASJ) ile işlenmesinde çok geçişli ve ileri açılı kesim stratejilerinin kerf geometrisi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Beyaz mermer (R1), bej mermer (R2), traverten (R3), oniks (R4), bazalt (R5) ve iki farklı tüf (R6 ve R7) olmak üzere yedi kayaç üzerinde toplam 98 kesme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çok geçişli deneylerde geçiş sayısının yanı sıra aşındırıcı besleme miktarı ve çalışma basıncı incelenmiş; ileri açılı kesimlerde jet temas açısı 75°–90° arasında değiştirilmiştir. Kesme genişliği ve kerf açısı temel performans göstergeleri olarak değerlendirilmiş, ayrıca bu parametrelerle kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler Spearman sıra korelasyon analiziyle araştırılmıştır. Çok geçişli kesim, kayaçların çoğunda kesme genişliğini %0,7–20,3 oranında azaltmıştır. En belirgin kerf açısı iyileşmesi R1'de elde edilmiş; değer tek geçişte 1,53° iken dört geçişte 0,51°'ye düşerek yaklaşık %67 azalmıştır. Aşındırıcı besleme miktarının artırılması çoğu kayaçta kesme genişliğini %2–24 artırırken, çalışma basıncındaki artış kayaç türüne bağlı olarak %26'ya varan azalmalar veya %28'e ulaşan artışlar oluşturmuştur. İleri açılı kesimde jet temas açısının kesme genişliğinden çok kerf açısı üzerinde etkili olduğu ve bazı kayaçlarda %35–65 azalma sağladığı belirlenmiştir. Korelasyon sonuçları, çok geçişli kesimde ortalama kerf açısının mineral tane yoğunluğuyla güçlü pozitif ilişki gösterdiğini ortaya koymuştur. İleri açılı kesimde ortalama kerf açısı su emme ve gözeneklilik göstergeleriyle güçlü negatif, P-dalga hızıyla güçlü pozitif ilişkiler sergilemiştir.

Anahtar kelimeler: Aşındırıcılı sujeti, doğaltaş, performans iyileştirme, kerf genişliği, kerf açısı.

Evolution of Kerf Geometry in Forward-Angling and Multi-Pass Abrasive Waterjet Cutting of Natural Stones: Experimental Insights into Kerf width and Kerf angle

Abstract: In this study, effects of multi-pass and forward-angled abrasive waterjet (AWJ) cutting strategies on the kerf geometry of natural stones were investigated. Overall, 98 cutting experiments were conducted on seven rock types. In the multi-pass experiments, the number of passes, abrasive flow rate, and water pressure were examined, whereas the jet impact angle was varied between 75° and 90° in forward-angled cutting. Kerf width and kerf taper angle were evaluated as performance indicators, and their relationships with physical and mechanical rock properties were investigated using Spearman's rank correlation. Multi-pass cutting reduced kerf width by 0.7–20.3% in most rocks. The greatest improvement in kerf taper angle was obtained for R1, decreasing by approximately 67%, from 1.53° after one pass to 0.51° after four passes. Increasing the abrasive flow rate increased kerf width by 2–24% in most rocks, while increasing water pressure produced rock-dependent reductions of up to 26% or increases of up to 28%. In forward-angled cutting, the jet impact angle affected kerf taper angle more strongly than kerf width and provided reductions of 35–65% in some rocks. The mean kerf taper angle was positively associated with mineral grain density in multi-pass cutting. In forward-angled cutting, it exhibited strong negative correlations with water-absorption and pore-structure indicators and a strong positive correlation with P-wave velocity.

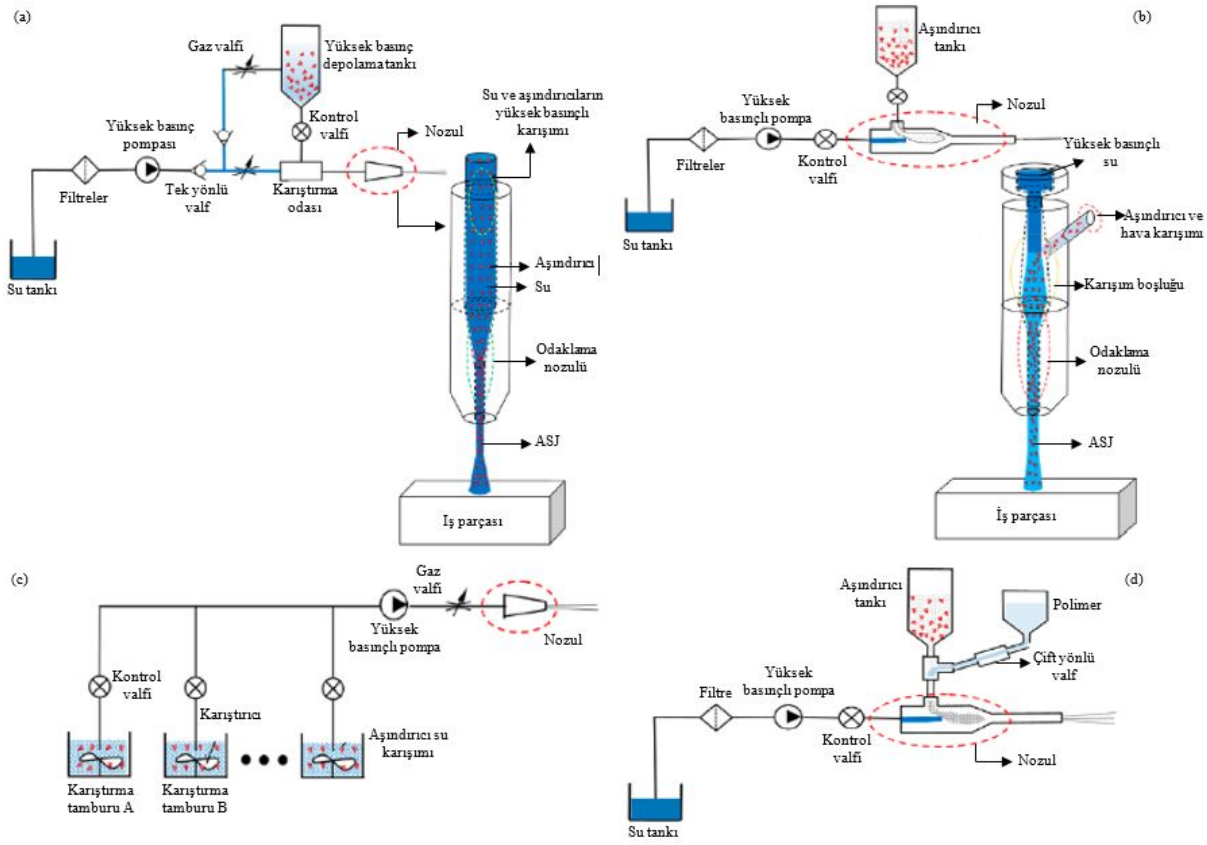
Keywords: Abrasive waterjet, natural stone, performance improvement, kerf width, kerf taper angle

1. Giriş

Çevresel koşullara karşı yüksek dirençleri, sert yapıları ve estetik görünümleri nedeniyle özellikle yapı sektöründe geniş kullanım alanı bulan doğal taşlar (mermer ya da granit gibi), dünya genelinde giderek artan bir talep ile karşı karşıyadır. Bu talep artışı, özellikle fabrikada nihai ürün üretim aşamalarında kullanılan geleneksel işleme teknolojilerinin geliştirilmesini de beraberinde getirmiştir ya da zorunlu kılmıştır. Bununla birlikte, Geleneksel mekanik kesme yöntemlerinde kesici takım ile kayaç arasındaki doğrudan temas, özellikle sert ve aşındırıcı kayaçlarda takım aşınmasına ve buna bağlı işletme sorunlarına neden olabilmektedir [1]. Bu nedenle, son yıllarda daha verimli ve sürdürülebilir alternatif teknolojilere yönelik arayışlar hız kazanmıştır. Bu kapsamda; geliştirilmesinden itibaren hızlı bir ilerleme gösteren ve farklı endüstriyel uygulamalarda önemli üstünlükler sergileyen aşındırıcılı sujeti (ASJ), özgün bir kesme yöntemi olarak modern kesme teknolojileri arasında ayrıcalıklı bir konuma sahiptir. Bir başka deyişle; geniş bir malzeme yelpazesini ve karmaşık geometrileri kesebilme yeteneği

[*] Sorumlu yazar. Yazarların ORCID Numarası: [3]0000-0007-5470-2189; [4]0000-0002-3360-8712; [5]000-0002-6670-6458; [6]0009-0001-1023-1318

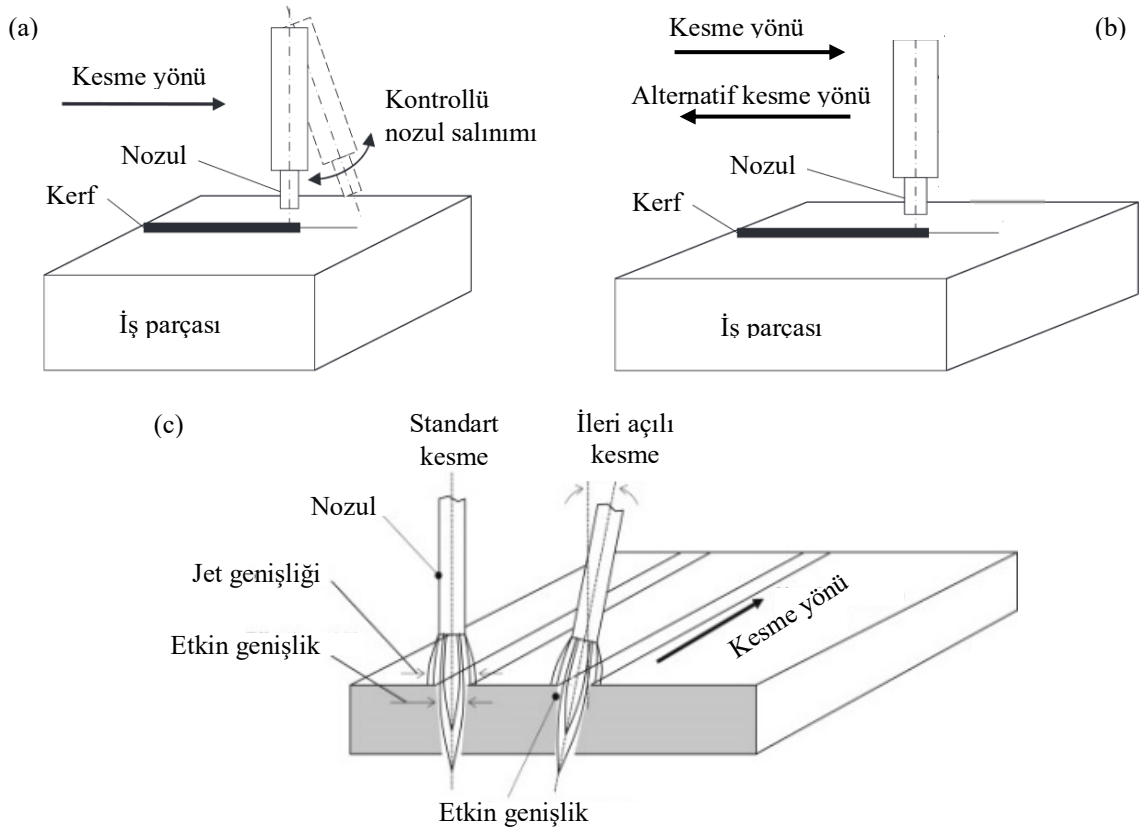
düşük kesme kuvveti gereksinimi, yüksek verimlilik, maliyet etkinliği, çevre dostu yapısı ve ısıl hasar oluşturmayan yapısı gibi özellikleriyle ASJ, diğer modern kesme teknolojiler arasında ön plana çıkmaktadır [2]. ASJ teknolojisi; basınç düzeyi, jet işleme yöntemi, kullanılan akışkan ortam, çalışma ortamı ve aşındırıcı karıştırma tekniği gibi çeşitli ölçütlere göre sınıflandırılsa da en yaygın ve temel sınıflandırma çalışma basıncı ile aşındırıcı ilavesine dayanmaktadır (Şekil 1) [3]. Ayrıca; ASJ teknolojisi, aşındırıcının su jeti içerisine dâhil edilme yöntemine bağlı olarak ön karışımlı (pre-mixed) ve sonradan karışımlı (post-mixed) olarak iki ana gruba da ayrılmaktadır. Bunlara ek olarak, aşındırıcı ile suyun daha etkin ve homojen şekilde karışmasını sağlamak amacıyla SAWJ ve AWSJ olmak üzere iki farklı aşındırıcı su jeti teknolojisi daha geliştirilmiştir. Bahsi geçen sınıflandırmalardan bağımsız olarak ASJ teknolojisinde malzeme uzaklaştırma ya da kesme işlemi aşınma ve erozyon mekanizmalarıyla meydana gelir. Daha açık bir ifadeyle, su ile karıştırılan aşındırıcı parçacıklar karıştırma odasında yüksek hız kazanırlar. Bu hızlanma, suyun potansiyel basınç enerjisini kinetik enerjiye dönüştüren küçük çaplı nozul sayesinde gerçekleşir. Daha sonra aşındırıcı parçacıklar içeren sujeti iş parçası üzerine yönlendirilir/püskürtülür ve kesme işlemi gerçekleşir.



Şekil 1. ASJ teknolojisi şematik gösterimi; a) ön karışımlı ASJ, b) sonradan karışımlı ASJ, c) SAWJ, d) AWSJ [3].

Sahip olduğu önemli üstünlükleri nedeniyle ASJ teknolojisine yönelik ilgili alanda teorik ve deneysel araştırmalardan süreç modellemeye kadar kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Buna rağmen, kesme derinliğinin ile kesme yüzey kalitesinin henüz istenilen düzeyde olmaması bu teknolojinin yaygın uygulama alanı bulmasını sınırlayan en önemli problemler olmaya devam etmektedir [4-7]. Bu bağlamda, kesme derinliği ve yüzey kalitesi başta olmak üzere ASJ teknolojisinin performansını iyileştirmek amacıyla son yıllarda kayda değer bilimsel ve teknolojik gelişmeler ortaya konulmuştur. Yeni geliştirilen teknikler arasında, çok geçişli kesim, kontrollü nozul salınımı ve jetin kesme düzlemine farklı açılardan yönlendirilmesi/ileri açılı jet uygulaması (bkz. Şekil 2) yöntemlerinin üstünlükleri çeşitli alanlarda yapılan çalışmalarla ortaya konulmuştur [8-12]. Bu nedenle, günümüze kadar bu teknikler ile gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçların genelleşebilmesi için söz konusu tekniklerin daha fazla uygulama alanında incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Dolayısıyla bu çalışma

kapsamında, ASJ ile kayaç kesme uygulamalarında çok geçişli kesim ve ileri açılı jet tekniklerinin performanslarının deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Kayaç kesme ve/veya işleme uygulamalarında ASJ çok geçişli kesim tekniğine odaklanan çalışmaların sınırlı ve ileri açılı jet uygulamasına ilişkin çalışmaların ise neredeyse yok denecek kadar az olması, bu çalışmanın gerçekleştirilmesine yönelik en önemli motivasyon kaynağı olmuştur. Çalışma kapsamında, mermer, kireçtaşı, traverten, bazalt, oniks ve tüften oluşan 7 farklı doğaltaş türü ile kesme deneyleri yapılmıştır ve kesme performans göstergesi olarak da örneklerin kesme genişlikleri ve kerf açıları ölçülmüştür.



Şekil 2. ASJ teknolojisi kesme performansı iyileştirme teknikleri: a) Kontrollü nozul salınımı, b) Çok geçişli kesim, c) İleri açılı kesim [12].

2. Literatür Özeti

Düşük malzeme kaybı, toz ve ısı oluşumunun bulunmaması ve hemen hemen tüm geometrik şekillerde kesebilme yeteneği gibi üstün avantajları sayesinde ASJ teknolojisi, dünya genelinde hem akademik çevrelerin hem de endüstriyel uygulamaların yoğun ilgisini çekmiş ve son yıllarda kayda değer bir gelişim süreci yaşamıştır. Son yıllara ait kayaçlara odaklanan çalışmaların bir özeti şu şekildedir. Khanna vd. [13] ile Shah ve Patel [14], sırasıyla mermer ve granit örneklerini kullandıkları çalışmalarında, ASJ kesme performansını malzeme uzaklaştırma oranı temelinde değerlendirmişlerdir. Karakurt vd. [12,15] granitik kayaçların ASJ ile kesilmesinde elde edilen kesme performansını, kesme genişliği ve derinliği temelinde deneysel ve istatistiksel açıdan ayrıntılı olarak araştırmışlardır. Mlynarczuk vd. [16], ASJ teknolojisinde yüzey kalitesindeki değişimleri tanımlamak amacıyla granitler üzerinde çalışmış ve ilerleme hızı ile nozul–iş parçası mesafesi gibi faktörlerin etkilerini incelemiştir. Mermer örneklerinin ASJ ile kesilmesine odaklanan Abdullah vd. [17], kesme performansını etkileyen kesme parametreleri ve malzeme özelliklerini istatistiksel analizler aracılığıyla incelemişlerdir. Oh vd. [18], granit ve şeyl kayaçları üzerinde yürüttükleri araştırmada, maksimum kinetik enerjinin jet enerjisi dağılımına etkisini esas alarak su jeti kesme derinliğinin tahminine yönelik bir model geliştirmişlerdir. Granitlerin ASJ ile kesimine odaklanan Oh ve Cho [19], kesme derinliğini tahmin etmeye yönelik bir model geliştirerek kesme

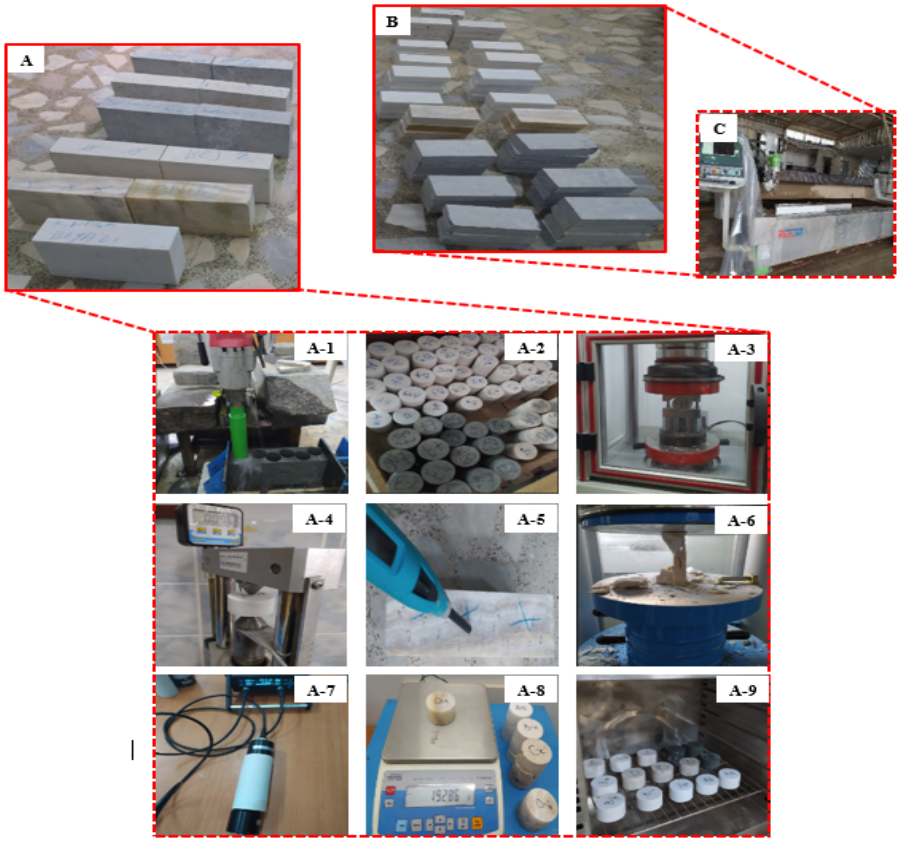
süresinin belirlenmesine katkı sağlamışlardır. De Abreu vd. [20] tarafından yürütülen çalışmada, süs taşlarının ASJ ile kesilmesinde yüksek ilerleme hızı ve düşük aşındırıcı miktarının maliyet etkinliği bakımından önemli avantajlar sağladığı tespit etmişlerdir. Alternatif aşındırıcı kullanımı üzerine çalışan Aydın vd. [23], granit parçacıklarının ASJ uygulamalarında aşındırıcı olarak kullanılabilecek nitelikleri karşıladığını belirlemişlerdir. Jiang vd. [24], granit kayaçların kesilmesine yönelik yürüttükleri çalışmalarında, kesikli su jeti teknolojisinin sürekli su jetine kıyasla daha etkin sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Arab ve Celestino [25], dört farklı kayaç üzerinde yürüttükleri ASJ kesme deneylerinde, kesme etkinliği ve kayaç parçalanma mekanizmalarının kayaçların fiziksel özellikleri ile mikro yapısal karakteristiklerine güçlü biçimde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Tripathi vd. [26] granit örnekleri üzerinde yürüttükleri deneylerde darbeli ve sürekli su jetlerinin aşındırma performanslarını karşılaştırmış ve darbeli su jetinin belirli çalışma koşullarında sürekli su jetine kıyasla daha etkili sonuçlar verebildiğini göstermiştir. Aydın vd. [27] ile Kaya vd. [28], silisyum karbür, çelik bilya, kahverengi ergitilmiş alümina ve beyaz ergitilmiş alüminanın aşındırıcı malzeme olarak kullanılması durumunda, geleneksel garnet aşındırıcısına göre daha üstün kesme performansları elde edildiğini ortaya koymuşlardır. Granit ve mermer örnekler üzerinde yürütülen araştırmalar, ASJ teknolojisinde çok geçişli kesme yönteminin tek geçişli kesmeye göre daha üstün kesme performansı ve verimlilik sunduğunu ortaya koymuştur [29-33]. Cha vd. [34], granitin ASJ ile kesimi sırasında, aşındırıcı parçacıkların yoğunluğu ve hızına bağlı olarak birbirine yakın boyuttaki parçacıkların çarpışma olasılığının daha yüksek olduğunu ve bunun kesme kabiliyetini azalttığını belirlemişlerdir. Li vd. [35], Liu vd. [36], Li vd. [37] ile Barabas ve Florescu [38], basınç, jet açısı, hedef mesafesi ve aşındırıcı konsantrasyonunun etkilerinin net bir şekilde ortaya konulmasının optimum delme performansının elde edilmesinde kritik öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır. Perec vd. [39], metamorfik kayaç sınıfında yer alan mermerin ASJ etkisi altındaki aşınma davranışını deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Chomka vd. [40], granit, kireçtaşı, bazalt ve mermer gibi çeşitli doğal taşların ASJ ile verimli kesimine yönelik enerji tüketimi ve işlem süresi gereksinimlerini deneysel olarak inceleyerek önemli bulgular ortaya koymuşlardır. Kumtaşı örnekleri üzerinde yürütülen çalışmada, Fan vd. [41] yapay sualtı koşullarında ASJ performansını değerlendirmiş ve yöntemin eşdeğer çalışma parametrelerinde daha etkin kaya parçalama kapasitesine sahip olduğunu göstermişlerdir. Granitin ASJ ile işlenmesini inceleyen Liu vd. [42], kesme derinliğinin başlıca tane boyutundan, yüzey pürüzlülüğünün ise ağırlıklı olarak kayaçtaki mineral türünden etkilendiğini göstermişlerdir. Wang vd. [43] tarafından yürütülen bir araştırmada, sert kayaçların ASJ ile kesimini incelemek amacıyla farklı kesme parametrelerini kapsayan sistematik deneyler gerçekleştirilmiştir. Aydın vd. [44], kayaçların ASJ ile kesiminde atık camın aşındırıcı olarak kullanım potansiyelini araştırmış ve performansını garnet ile karşılaştırmışlardır. Rogai vd. [45], farklı kayaçlar üzerinde gerçekleştirilen ASJ çok geçişli ve ileri açılı kesimlerinden elde edilen yüzey çizik açısı değerlerini makine öğrenmesi algoritmaları ile modellemiş ve optimize etmişlerdir. Rogai vd. [46], farklı kayaç türlerinde ASJ ile çok geçişli ve ileri açılı kesim tekniklerinin kesme derinliğine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir Kaya vd. [47], farklı kayaç türleri ve aşındırıcı malzemeler kullanarak ASJ kesiminde örnek ve aşındırıcı özelliklerinin malzeme uzaklaştırma oranı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Aydın vd. [48], çeşitli aşındırıcıların kırılganlık davranışlarını karşılaştırmak amacıyla dolaylı öğütme esaslı bir yöntem geliştirmişlerdir.

Yukarıdaki özetten de açıkça görüldüğü üzere, literatürde çok geçişli ASJ kesiminin kesme performansı üzerindeki etkilerini inceleyen çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, bu araştırmaların büyük bölümü kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı, yüzey özellikleri veya belirli malzemelerdeki kesme verimliliğine odaklanmıştır. Buna karşılık geçiş sayısının kerf genişliği ve özellikle kerf açısı üzerindeki etkisinin, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip geniş bir doğal taş grubu üzerinde sistematik ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi sınırlı kalmıştır. Ayrıca aşındırıcı besleme miktarı ve çalışma basıncının çok geçişli kesim koşullarında bu iki geometrik performans göstergesi üzerindeki etkileri ile söz konusu etkilerin kayaç türüne bağlı değişimi yeterince açıklığa kavuşturulmamıştır. Mevcut çalışma, bu bilimsel boşluğu doldurmak amacıyla yedi farklı doğal taşta geçiş sayısı, aşındırıcı besleme miktarı ve çalışma basıncının kerf genişliği ve kerf açısı üzerindeki etkilerini birlikte ve karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Bunun yanında ileri açılı kesimin aynı geometrik göstergeler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi, çok geçişli ve ileri açılı kesim stratejilerinin kerf geometrisi bakımından bütüncül olarak karşılaştırılmasına imkân sağlamaktadır. Böylece çalışma, ASJ kesiminde daha dar ve daha paralel duvarlı kerflerin elde edilmesine yönelik kayaç türüne özgü deneysel kanıtlar sunmaktadır.

3. Deneysel Çalışmalar

3.1. Malzeme

Çalışmada kullanılan kayaçlar, Türkiye'de faaliyet gösteren ticari bir firmadan temin edilen ve beyaz mermer (R1), bej mermer (R2), traverten (R3), oniks (R4), bazalt (R5), Kayseri tüfü (R6) ve Bayburt tüfü (R7) olarak adlandırılan farklı doğaltaş örneklerinden seçilmiştir. Kayaç özelliklerinin (fiziksel ve mekanik özellikler) belirlenmesi ve deneysel çalışmaların yürütülmesi amacıyla hazırlanan numunelerin boyutları sırasıyla 100mm × 200^{mm} × 400^{mm} ve 5^{mm} × 10^{mm} × 20^{mm}'dir. Şekil 3'te, kayaç özelliklerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen işlemler ile birlikte çalışma kapsamında kullanılan örneklere ait bir gösterim sunulmuştur. Kayaç örneklerinin fiziksel ve mekanik özellikleri, uluslararası kabul görmüş ilgili standartlara uygun olarak belirlenmiştir [49,50]. Tablo 1'de ASJ kesme deneylerinde kullanılan kayaç örneklerine ait fiziksel ve mekanik özellikler ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca, ASJ ile kesme deneylerinde aşındırıcı malzeme olarak Hindistan menşeli, 3,8 özgül ağırlığa, $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$ mineralojik bileşimine sahip ve %90'ından fazlası 80 mesh boyutunda olan almandin granatı kullanılmıştır.

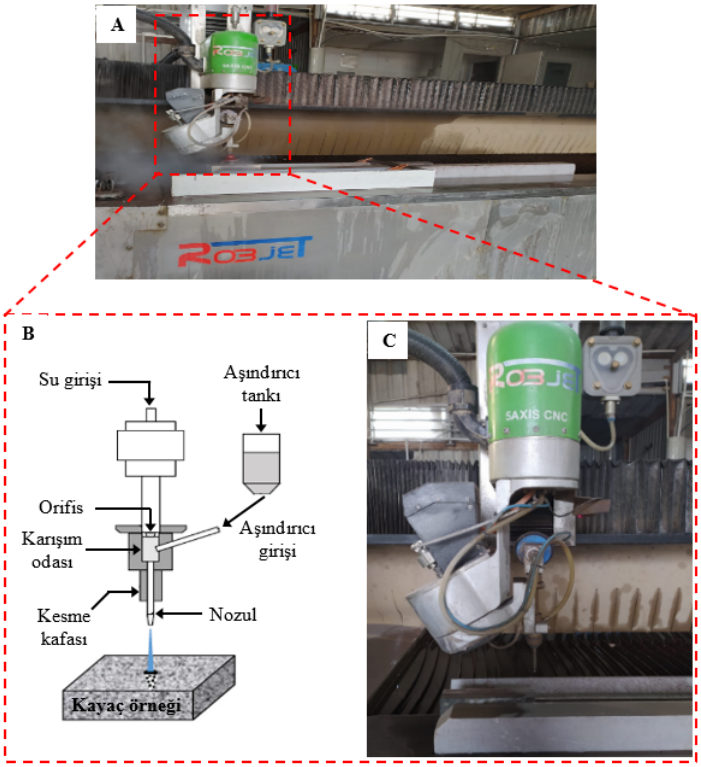


Şekil 3. Çalışmada kullanılan örnekler ve bu örneklerin fiziksel-mekanik özelliklerinin belirlenmesinde uygulanan deneysel işlemlerin gösterimi. A: Blok numuneler, B: ASJ ile kesme deneyi örnekleri, C: Deneylerde kullanılan ASJ sistemi, A-1: Karot alma işlemi, A-2: Karot örnekleri, A-3: Endirekt çekme dayanımı deneyi, A-4: Nokta yük dayanımı deneyi, A-5: Schmidt çekici sertlik deneyi, A-6: Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, A-7: Ultrasonik hız ölçümü, A-8 ve A-9: Su içeriği tayin işlemleri

3.2. Deney düzeneği ve izlenen yöntem

Kayaç örneklerinin özelliklerinin ve kesme deneyleri için boyutlandırma işlemlerinin tamamlanmasının ardından, örnekler kesme deneylerinin gerçekleştirildiği İstanbul'da faaliyet gösteren bir fabrikaya taşınmıştır. Kesme testlerinde kullanılan ASJ makinesine ait genel görünüm Şekil 4'te sunulmuştur. Kesme deneylerinin gerçekleştirildiği ASJ makinesi, maksimum 3800 bar basınç kapasitesine sahip yoğunlaştırıcı tip yüksek basınç

pompası ile donatılmıştır. Beş eksenli doğrusal hareket sistemine monte edilmiş olan su jeti kesme kafası, 0° ile 90° arasında değişen farklı açılarda kesim yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, ASJ nozulü 1,1 mm çap ve 75 mm uzunluğa sahip olup, orifis çapı ise 0,33 mm'dir. Bunun yanı sıra, orifis safirden, odaklama tüpü ise tungsten karbürden imal edilmiştir. Tablo 2'de sunulan çalışma değişkenlerine ait seviyeler; her bir kayaç için gerçekleştirilen ön denemeler, literatürdeki çalışmalar ve ASJ makinesinin teknik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Kayaç örnekleri, $5^{mm} \times 200^{mm}$ boyutlarındaki yüzeyleri üste gelecek şekilde ASJ kesme kafasının altına dikey olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği. A: ASJ makinesi, B: Kesme kafasının şematik gösterimi, C: Kesme kafası.

Başka bir ifadeyle, kayaç numunelerinin 200 mm uzunlukları boyunca kesilmesi sağlanmıştır. Tablo 2'den de anlaşılacağı üzere çok geçişli kesim uygulamalarında ilerleme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, çalışma basıncı, geçiş sayısı ve kesim yönü farklı değerlerde test edilirken, ileri açılı kesim uygulamalarında değiştirilen tek değişken jetin ileri açısı olmuştur. Bir başka ifade ile deneysel çalışma, çok geçişli ve ileri açılı kesim olmak üzere iki ana aşamada yürütülmüştür (Tablo 3). İlk aşamada, yedi kayaç türünün her biri için tek, iki, üç ve dört geçişli temel kesimler gerçekleştirilerek 28 deney yapılmıştır. Daha sonra aşındırıcı besleme miktarı 300 g/dk'dan 450 g/dk'ya yükseltilmiş ve aynı geçiş seviyeleri tüm kayaçlarda tekrarlanarak 28 ilave deney gerçekleştirilmiştir. Çalışma basıncının etkisini değerlendirmek amacıyla ise basınç 180 MPa'dan 220 MPa'ya yükseltilmiş ve seçilen beş kayaçta üç geçiş seviyesi uygulanarak 15 deney yapılmıştır. Böylece çok geçişli kesme aşaması toplam 71 deneyden oluşmuştur. İkinci aşamada, jet temas açısının etkisini incelemek amacıyla 88°, 85°, 80° ve 75° açılarında 28 ilave deney planlanmıştır. Ancak R7 numunesinin 75° deneyinde kırılması nedeniyle bu deney tamamlanamamış ve analize 27 ileri açılı kesim deneyi dâhil edilmiştir. 90° referans kesimleri temel çok geçişli deney grubundaki tek geçişli kesimlerden sağlandığından ayrıca sayılmamıştır. Sonuç olarak, çalışmada toplam 98 geçerli kesme deneyi değerlendirilmiştir. Diğer taraftan, ilerleme hızı, etkisi bağımsız olarak incelenen bir deney değişkeni olarak ele alınmamış, geçiş sayısıyla birlikte tanımlanan eşleştirilmiş bir kontrol parametresi olarak kullanılmıştır. Tek, iki, üç ve dört geçişli kesimlerde ilerleme hızı sırasıyla 300, 600, 900 ve 1200 mm/dk olarak uygulanmıştır. Böylece geçiş sayısı artırılırken ilerleme hızı da aynı oranda yükseltilmiş ve birim kesme uzunluğu başına toplam jet maruziyeti yaklaşık olarak sabit tutulmuştur (NP/TS=1/300). Bu deneysel tasarım, farklı geçiş düzenlerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamakla birlikte, ilerleme hızının etkisinin geçiş sayısından bağımsız olarak belirlenmesine imkân vermemektedir. Bu nedenle sonuçlar, ilerleme hızının tekil etkisi yerine,

geçiş sayısı–ilerleme hızı eşleştirmesine dayalı çok geçişli kesme stratejisinin kerf geometrisi üzerindeki birleşik etkisi kapsamında değerlendirilmiştir. Kesme deneylerinin tamamlanmasının ardından, kayaç örnekleri kesim öncesindeki doğal su içeriklerine ulaşabilmeleri için laboratuvarda iki hafta boyunca oda sıcaklığında bekletilmiştir. Daha sonra, kerf ya da kesik yarığı içerisinde kalabilecek aşındırıcı taneleri, toz ve/veya kayaç parçacıklarını uzaklaştırmak amacıyla bir kompresör yardımıyla basınçlı hava uygulanmıştır. Son aşamada ise kerf genişlikleri ve kerf açıları Şekil 5'te gösterildiği gibi ölçülmüştür. Diğer yandan, çalışmada tanımlanan 98 deney koşulunun her biri için bir bağımsız kesme deneyi gerçekleştirilmiştir (n = 1). Diğer bir ifadeyle, aynı deney koşulu altında bağımsız kesme tekrarı yapılmamıştır. Bununla birlikte, kesme genişliğinin kesim hattı boyunca gösterebileceği yerel değişkenliği dikkate almak amacıyla her bir kesim hattı üzerinde 2 cm aralıklarla dokuz ayrı ölçüm alınmıştır. Her deney koşuluna ait kesme genişliği, bu dokuz ölçümün aritmetik ortalaması olarak hesaplanmıştır. Bu ölçümler, bağımsız deney tekrarları değil, aynı kesim hattı üzerindeki tekrarlı konumsal ölçümlerdir. Kerf açılarını hesaplamak amacıyla, kerfin üst kısmındaki genişliği ifade eden üst genişlik (*Wt*), deformasyon aşınmasının (DWZ) başladığı noktadaki genişliği ifade eden alt genişlik (*Wb*) ve son olarak kerfin üst yüzeyinden kesme aşınma bölgesinin (CWZ) sonuna kadar olan düşey mesafe (*h*) yine kumpas kullanılarak ölçülmüştür (bkz. Şekil 5). Daha sonra elde edilen veriler denklem [1]'de yerine konulmuş ve tüm kayaç örneklerine ait kerf açıları hesaplanmıştır.

$$\alpha = tan^{-1}\left(\frac{W_t - W_b}{2h}\right) \quad [1]$$

[1] denkleminde*;* α kerf açısını (derece), W_t üst kerf genişliğini (mm), W_b alt kerf genişliğini (mm) ve h ise üst kerf genişliğinden deformasyon aşınma bölgesinin başlangıcına kadar olan dikey mesafeyi (mm) ifade etmektedir.

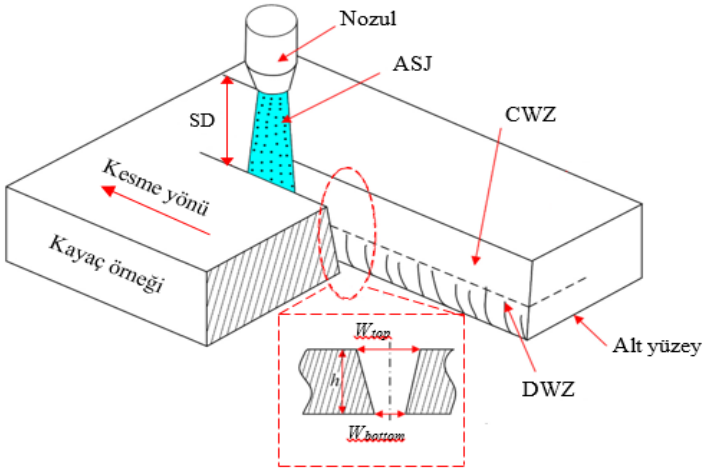
Tablo 1. Çalışmada kullanılan kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri.

	Kayaç Adı						
Özellik	**R1**	**R2**	**R3**	**R4**	**R5**	**R6**	**R7**
X1 (%)	0,102	0,120	1,339	0,059	1,766	7,61	12,71
X2 (%)	0,026	0,083	1,165	0,033	0,650	6,61	7,14
X3 (%)	0,076	0,036	0,155	0,025	1,102	0,50	4,67
X4 (%)	74,907	30,634	13,050	49,259	64,279	6,55	36,74
X5 (gr/cm^3)	2,675	2,645	2,419	2,689	2,661	1,99	1,73
X6 (gr/cm^3)	2,680	2,652	2,498	2,693	2,761	2,33	2,09
X7 (%)	0,274	0,319	3,201	0,158	4,644	15,05	20,97
X8 (%)	0,274	0,320	3,322	0,159	4,887	17,73	26,53
X9 (MPa)	6,533	8,686	6,055	6,617	10,429	3,85	4,58
X10 (MPa)	5,955	5,886	4,643	3,569	12,274	3,71	2,54
X11 (MPa)	92,098	125,125	54,247	95,602	155,140	56,24	41,85
X12 (m/s)	6621	6477	5793	7001	5885	2360	2677
X13, Q	73	76,55	66,85	69,8	77,8	70,60	59,65

X1: Su emme kapasitesi, **X2:** Efektif su emme oranı, **X3:** Doğal su içeriği, **X4:** Doygunluk derecesi, **X5:** Doğal yoğunluk, **X6:** Mineral tane yoğunluğu, **X7:** Efektif porozite, **X8:** Boşluk oranı, **X9:** Endirekt çekme dayanımı, **X10:** Nokta yük dayanımı, **X11:** Tek eksenli basınç dayanımı, **X12:** Ultrasonik dalga hızı (P-dalga hızı), **X13:** Schmidt çekici sertliği

Son olarak, kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile kerf geometrisi arasındaki ilişkileri nicel olarak değerlendirmek amacıyla Spearman sıra korelasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Analizde, her kayaç için çok geçişli ve ileri açılı kesim koşullarında elde edilen ortalama kerf genişliği (KG_{ort}) ve ortalama kerf açısı (KA_{ort}) değerleri kullanılmıştır. Ayrıca, kayaç özelliklerinin çok geçişli ve ileri açılı kesime verilen tepkiyle ilişkisini belirlemek amacıyla kerf genişliği ve kerf açısında meydana gelen yüzdesel değişimler hesaplanarak analize dâhil edilmiştir. Spearman korelasyonunun tercih edilmesinde kayaç sayısının sınırlı olması (n=7) ve değişkenler için

normal dağılım ile doğrusal ilişki varsayımlarının güvenilir biçimde doğrulanamaması etkili olmuştur. Korelasyon katsayısının mutlak değeri $|r_s|<0.40$ için zayıf, $0.40\leq|r_s|<0.70$ için orta ve $|r_s|\geq0.70$ için güçlü ilişki olarak değerlendirilmiştir. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p<0.05$ olarak kabul edilmiştir. Bununla birlikte, sınırlı örneklem büyüklüğü ve incelenen çok sayıdaki ilişki nedeniyle sonuçlar keşifsel olarak yorumlanmıştır.



Şekil 5. Kesme genişliği ve kerf açısı hesaplamalarına yönelik şematik gösterim.

Tablo 2. Deney değişkenleri ve seviyeleri.

Değişken	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5
TS (mm/dk)[a]	300	600	900	1200	
NP	1	2	3	4	
WP (MPa)	180	220			
AFR (g/dk)	300	450			
SD (mm)	4				
APS (mesh)	80				
JIA (Derece)	90	88	85	80	75
Kesme yönü	Alternatif[b]				

TS: İlerleme hızı, NP: Geçiş sayısı, WP: Çalışma basıncı, AFR: Aşındırıcı besleme miktarı, SD: Nozul kayaç arası mesafe, APS: Aşındırıcı tane boyutu, JIA: Jet temas açısı
a: İlerleme hızı bağımsız olarak değiştirilmemiş, geçiş sayısıyla eşleştirilmiştir. NP = 1, 2, 3 ve 4 için TS sırasıyla 300, 600, 900 ve 1200 mm/dk olarak uygulanmış; böylece NP/TS oranı ve birim kesme uzunluğu başına toplam jet maruziyeti sabit tutulmuştur..
b: Yalnızca çok geçişli kesim uygulamaları için geçerlidir.

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. ASJ çok geçişli kesim tekniğinin kesme genişliğine ve kerf açısına etkisi

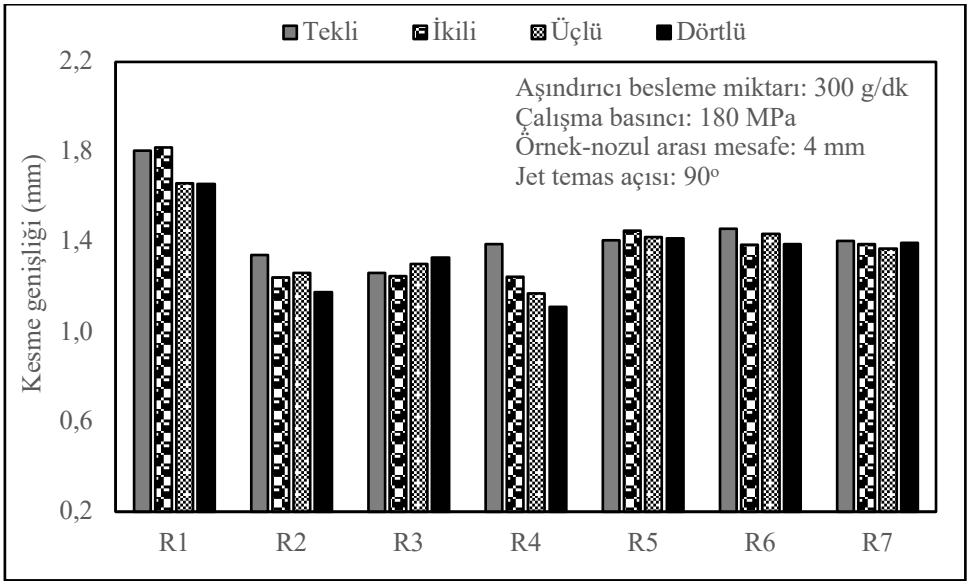
Çok geçişli kesim uygulamasının kayaç kesme genişlikleri üzerindeki etkisi Şekil 6'da sunulmuştur. Sonuçlar, çok geçişli kesmenin kesme genişliği üzerindeki etkisinin kayaç türüne bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Tek kesime kıyasla dört kesimde R1, R2, R4, R6 ve R7 örneklerinde kesme genişliği sırasıyla yaklaşık %8,3, %11,3, %20,3, %4,1 ve %0,7 oranlarında azalmıştır. En belirgin düşüş R4 örneğinde gözlenmiş olup kesme genişliği yaklaşık 1,38 mm'den 1,10 mm'ye gerilemiştir. Buna karşılık, R3 örneğinde geçiş sayısının artması kesme genişliğini yaklaşık %4,8 oranında artırmış ve değer 1,26 mm'den 1,32 mm'ye yükselmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çok geçişli kesim uygulamalarının çoğu kayaçta kesme

genişliğini azaltma eğiliminde olduğu ve bu azalmanın %0,7 ile %20,3 arasında değiştiği görülmektedir. Örnek kesme genişliklerinde gözlenen bu davranış, ilk geçişlerde oluşturulan kerfin sonraki geçişlerde jeti daha etkin bir şekilde yönlendirmesi ve jet enerjisinin kerf tabanında yoğunlaşmasıyla açıklanabilir. Böylece yanal aşındırma etkisi azalmakta ve daha dar kesme genişlikleri oluşmaktadır.

Tablo 3. Çalışmada uygulanan deneysel tasarım ve deneylerin dağılımı.

Deney grubu	Kayaçlar	Değiştirilen parametre	Değişken seviyeleri	Sabit tutulan parametreler	Deney sayısı
Çoklu kesim	R1 – R7	NP ve buna karşılık gelen TS	NP = 1, 2, 3 ve 4; TS = 300, 600, 900 ve 1200 mm/dk	WP = 180 MPa; AFR = 300 g/dk; SD = 4 mm; APS = 80 mesh; JIA = 90°	7 × 4 = 28
Arttırılmış AFR'li çoklu kesim	R1 – R7	NP ve AFR	NP = 1–4; AFR = 450 g/dk	WP = 180 MPa; SD = 4 mm; APS = 80 mesh; JIA = 90°	7 × 4 = 28
Arttırılmış WP'li çoklu kesim	R1, R2, R4, R6 ve R7	NP ve WP	NP = 1–3; WP = 220 MPa	AFR = 300 g/dk; SD = 4 mm; APS = 80 mesh; JIA = 90°	5 × 3 = 15
İleri açılı kesim	R1 – R7	Jet temas açısı	JIA = 88°, 85°, 80° ve 75°	WP = 180 MPa; AFR = 300 g/dk; SD = 4 mm; APS = 80 mesh; NP = 1	(7 × 4) − 1 = 27
Toplam					98

TS seviyeleri geçiş sayısıyla eşleştirilmiştir: NP = 1, 2, 3 ve 4 için TS sırasıyla 300, 600, 900 ve 1200 mm/dk olarak uygulanmıştır. Çok geçişli kesimlerde ardışık geçişler alternatif yönlerde gerçekleştirilmiştir. İleri açılı kesim grubundaki 90° referans değerleri, çok geçişli deney grubunda gerçekleştirilen tek geçişli dik kesimlerden elde edildiği için toplam deney sayısına yeniden eklenmemiştir. Ayrıca R7 numunesinin 75° açısındaki kesim sırasında kırılması nedeniyle söz konusu deney tamamlanamamıştır.



Şekil 6. Çok geçişli kesim koşullarında kayaçlara ait kerf genişliği değerleri.

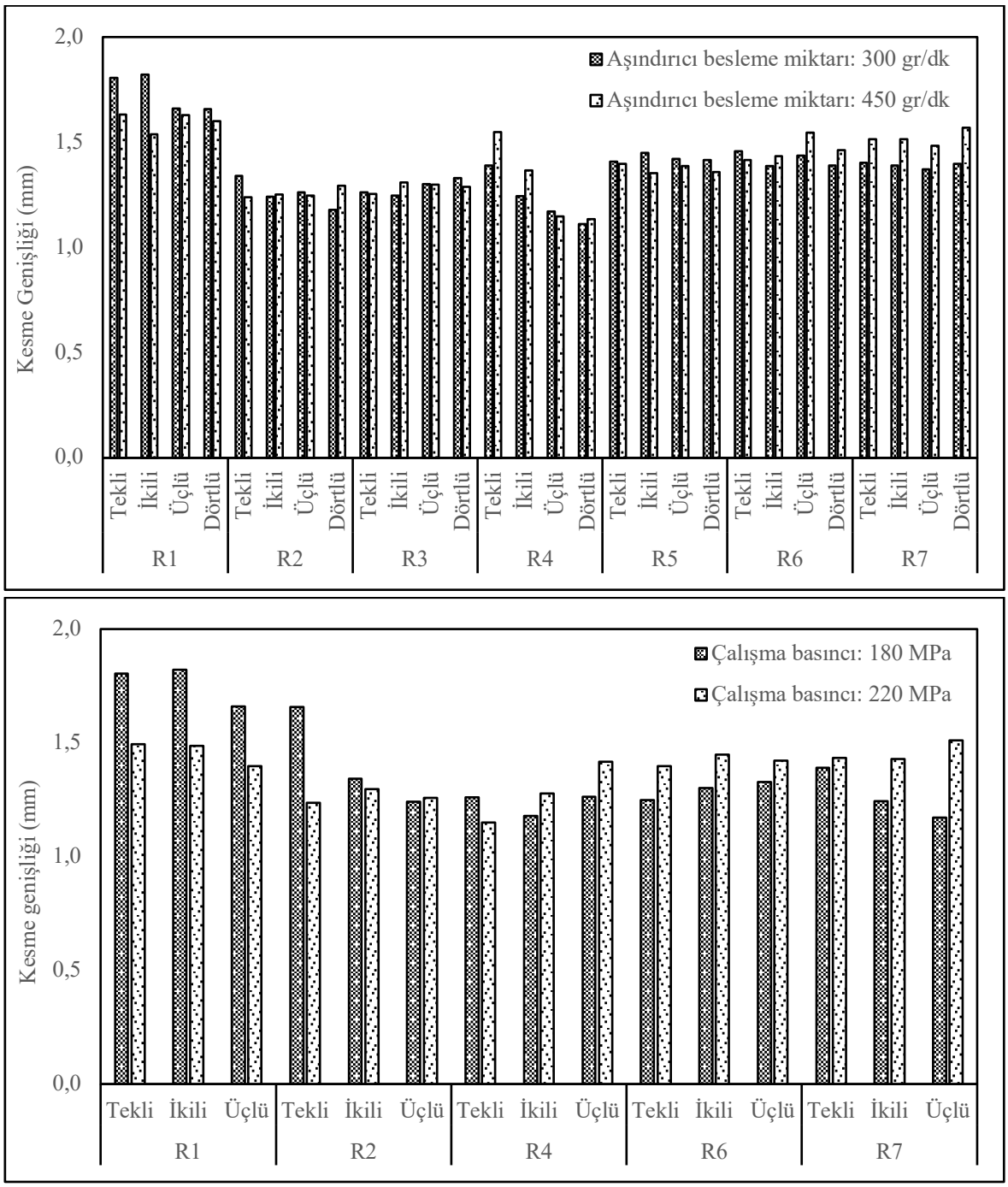
Özellikle R1, R2 ve R4 örneklerinde gözlenen %8'in üzerindeki azalmalar, çok geçişli kesmenin kesme kanalını derinleştirirken yan duvarlardaki malzeme uzaklaştırma miktarını sınırlandırdığını göstermektedir. Diğer taraftan R3 örneğinde gözlenen %4,8'lik artış, tekrarlanan jet darbelerinin kerf duvarlarında ilave malzeme uzaklaştırmasını kolaylaştırmış olabileceğini düşündürmektedir. Literatürde, tekrarlı aşındırıcı su jeti etkisinin

mevcut çatlakların ilerlemesine, yeni mikro çatlakların gelişmesine ve tane ölçekli kopmalara katkı sağlayabildiği bildirilmiştir [25,32,36,37]. Bununla birlikte, mevcut çalışmada mikroskobik hasar doğrudan incelenmediğinden, mikro çatlak ve tane kopması mekanizmaları R3'te gözlenen artış için olası bir açıklama olarak değerlendirilmiştir. R6 ve R7 örneklerinde değişimin %5'in altında kalması ise bu kayaçların çok geçişli kesme koşullarına karşı daha kararlı bir davranış sergilediğini ve kesme genişliğinin geçiş sayısından sınırlı düzeyde etkilendiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, çok geçişli ASJ uygulamalarında kesme genişliğinin yalnızca işlem parametrelerine değil, aynı zamanda kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine de bağlı olduğunu ve optimum kerf geometrisinin elde edilmesi için geçiş sayısının kayaç özellikleri dikkate alınarak belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 7, iki farklı aşındırıcı besleme miktarının (300 ve 450 g/dk) ve çalışma basıncının (180 MPa ve 220 MPa) çok geçişli kesim uygulamasındaki kesme genişliği üzerindeki etkisini göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, aşındırıcı besleme miktarının 300 g/dk'dan 450 g/dk'ya yükseltilmesi çoğu kayaçta kesme genişliğinin artmasına neden olmuş, ancak bu etkinin büyüklüğü kayaç türüne ve geçiş sayısına bağlı olarak değişmiştir. R1 örneğinde kesme genişliği tek kesimde yaklaşık %−8,9 azalırken, dört kesimde yalnızca %−2,9 oranında azalmıştır. Buna karşın R3, R4, R6 ve R7 örneklerinde tüm geçiş sayılarında artışlar gözlenmiş olup, en yüksek artış R4 örneğinde elde edilmiştir. Bu kayaçta kesme genişliği tek kesimde yaklaşık %11,5, iki kesimde %24,2, üç kesimde %16,7 ve dört kesimde %2,7 oranında artmıştır. R6 ve R7 örneklerinde ise artışlar sırasıyla yaklaşık %3,4–10,7 ve %8,6–12,9 aralığında gerçekleşmiştir. R2 örneğinde değişim oldukça sınırlı olup bazı geçişlerde hafif azalma, bazı geçişlerde ise %8'e varan artışlar meydana gelmiştir. R5 örneğinde ise aşındırıcı besleme miktarındaki artışın kesme genişliği üzerinde belirgin ve sistematik bir etkisi görülmediği söylenebilir.

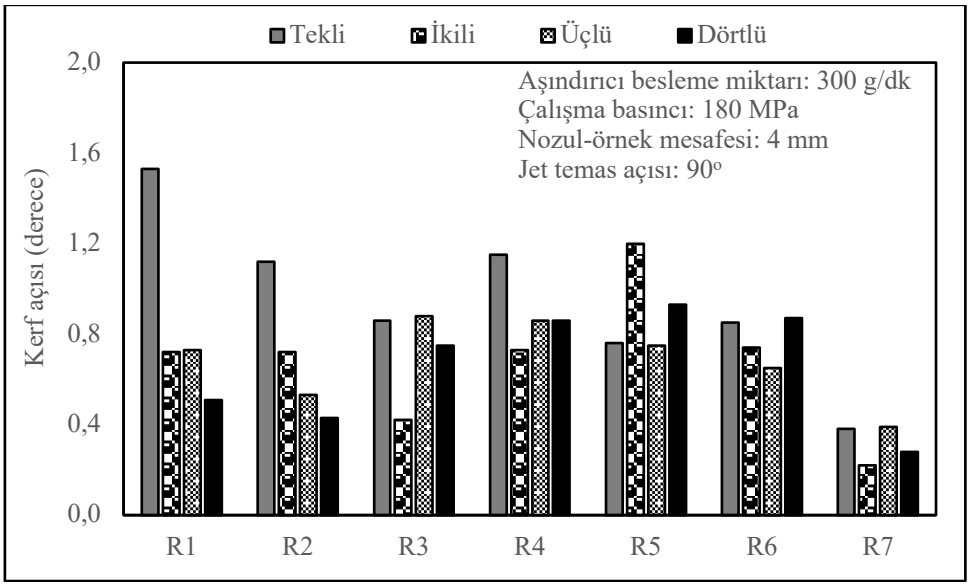
Çok geçişli kesim uygulamasında çalışma basıncında artırılan bir seviye, aşındırıcı besleme miktarındaki artışa benzer şekilde kayaç türüne bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya koymuştur. R1 ve R2 örneklerinde basınç artışı kesme genişliğini azaltırken, R4, R6 ve R7 örneklerinde ise artırmıştır. R1 örneğinde kesme genişliği tek, iki ve üç kesimlerde sırasıyla yaklaşık %17,2, %18,2 ve %15,2 oranlarında azalmıştır. Benzer şekilde R2 örneğinde azalma oranları sırasıyla %25,8, %4,5 ve %1,6 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık R4 örneğinde basınç artışıyla kesme genişliği tek kesimde yaklaşık %−8,8 oranında azalırken, iki ve üç kesimlerde sırasıyla %7,6 ve %13,6 oranlarında artmıştır. R6 örneğinde artış oranları %11,2–15,2 aralığında gerçekleşirken, R7 örneğinde bu değerler %3,6 ile %28,2 arasında değişmiştir. Özellikle R7 örneğinin üç kesiminde kesme genişliği yaklaşık 1,18 mm'den 1,51 mm'ye yükselerek tüm deneyler içerisindeki en yüksek artışı göstermiştir. Aşındırıcı besleme miktarının artırılmasıyla çoğu kayaçta gözlenen kerf genişliği artışı, jet tarafından taşınan aşındırıcı parçacık miktarının ve parçacıkların kerfin yan duvarlarıyla etkileşme olasılığının artmasıyla ilişkilendirilebilir. Özellikle R4, R6 ve R7 örneklerinde gözlenen %10'un üzerindeki artışlar, aşındırıcı besleme miktarındaki artışın kerf yan duvarlarından malzeme uzaklaştırılmasını artırmış olabileceğine işaret etmektedir. Önceki çalışmalar, uygun çalışma koşullarında daha fazla aşındırıcı parçacığın kayaç yüzeyiyle etkileşmesinin darbe sıklığını ve malzeme uzaklaştırma olasılığını artırabileceğini; bu sürecin mikro kırılma, çatlak ilerlemesi ve tane kopması mekanizmalarıyla gerçekleşebileceğini bildirmiştir [22,25,36,43]. Ancak bu çalışmada parçacık darbeleri ve mikroskobik hasar doğrudan gözlemlenmediğinden, söz konusu mekanizma deneysel olarak doğrulanmış bir sonuçtan ziyade gözlenen kerf genişliği artışının literatüre dayalı olası bir açıklamasıdır. Buna karşılık, R1 örneğindeki azalma, yüksek aşındırıcı konsantrasyonunda parçacıklar arası etkileşimlerin etkin enerji aktarımını ve kerf yan duvarlarından malzeme uzaklaştırılmasını sınırlamasıyla ilişkilendirilebilir. Jet ve parçacık davranışları doğrudan ölçülmediğinden, bu yorum deneysel olarak doğrulanmamıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, aşındırıcı besleme miktarının artırılması çoğu kayaçta kesme genişliğini %2–24 arasında artırma eğilimi göstermiştir. Ancak bu etkinin kayaçların mineralojik ve fizikomekanik özelliklerine bağlı olarak değişmesi, optimum kerf geometrisinin elde edilmesinde aşındırıcı besleme miktarının kayaç türüne özgü olarak belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, çok geçişli aşındırıcılı su jeti uygulamalarında aşındırıcı tüketimi ile kesme kalitesi arasındaki dengenin dikkatle optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, çalışma basıncının artırılmasıyla jet hızının ve aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjisinin yükseldiğini, bunun da kayaç türüne bağlı olarak farklı kırılma mekanizmalarını tetiklediğini göstermektedir. R4, R6 ve R7 örneklerinde çalışma basıncının artırılmasıyla kerf genişliğinde gözlenen %8–28 aralığındaki artış, daha yüksek basınç koşullarında aşındırıcı parçacıkların kayaç yüzeyine daha yüksek kinetik enerjiyle ulaşması ve kerf yan duvarlarından malzeme uzaklaştırma kapasitesinin artmasıyla ilişkili olabilir. Literatürde, parçacık enerjisindeki artışın kayaçlarda mikro çatlak başlatma ve ilerletme, tane sınırlarında hasar oluşturma ve tane kopmasını kolaylaştırma potansiyeline sahip olduğu bildirilmiştir [25,35–37,43]. Bununla birlikte, mevcut çalışmada mikro çatlaklar ve tane kopmaları doğrudan incelenmediğinden bu mekanizmalar gözlenen kerf genişliği artışını açıklayabilecek olası süreçler olarak sunulmaktadır. R1 ve R2 örneklerinde çalışma basıncının artırılmasıyla kerf genişliğinde gözlenen azalma, artan jet momentumunun malzeme uzaklaştırmayı yanal yönden çok kesme derinliği doğrultusunda desteklemiş olabileceğini düşündürmektedir. Bununla birlikte, jet koheransı ve kerf

içerisindeki enerji dağılımı doğrudan ölçülmediğinden bu açıklama literatüre dayalı olası bir mekanizma olarak değerlendirilmelidir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışma basıncının 180 MPa'dan 220 MPa'ya çıkarılması kesme genişliğinde yaklaşık %26'ya varan azalmalar veya %28'e ulaşan artışlar oluşturabilmekte olup, bu durum basıncın kesme genişliği üzerindeki etkisinin kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Dolayısıyla, çok geçişli aşındırıcılı su jeti uygulamalarında optimum kerf geometrisinin elde edilmesi için çalışma basıncının kayaç türüne özgü olarak seçilmesi gerekmektedir.



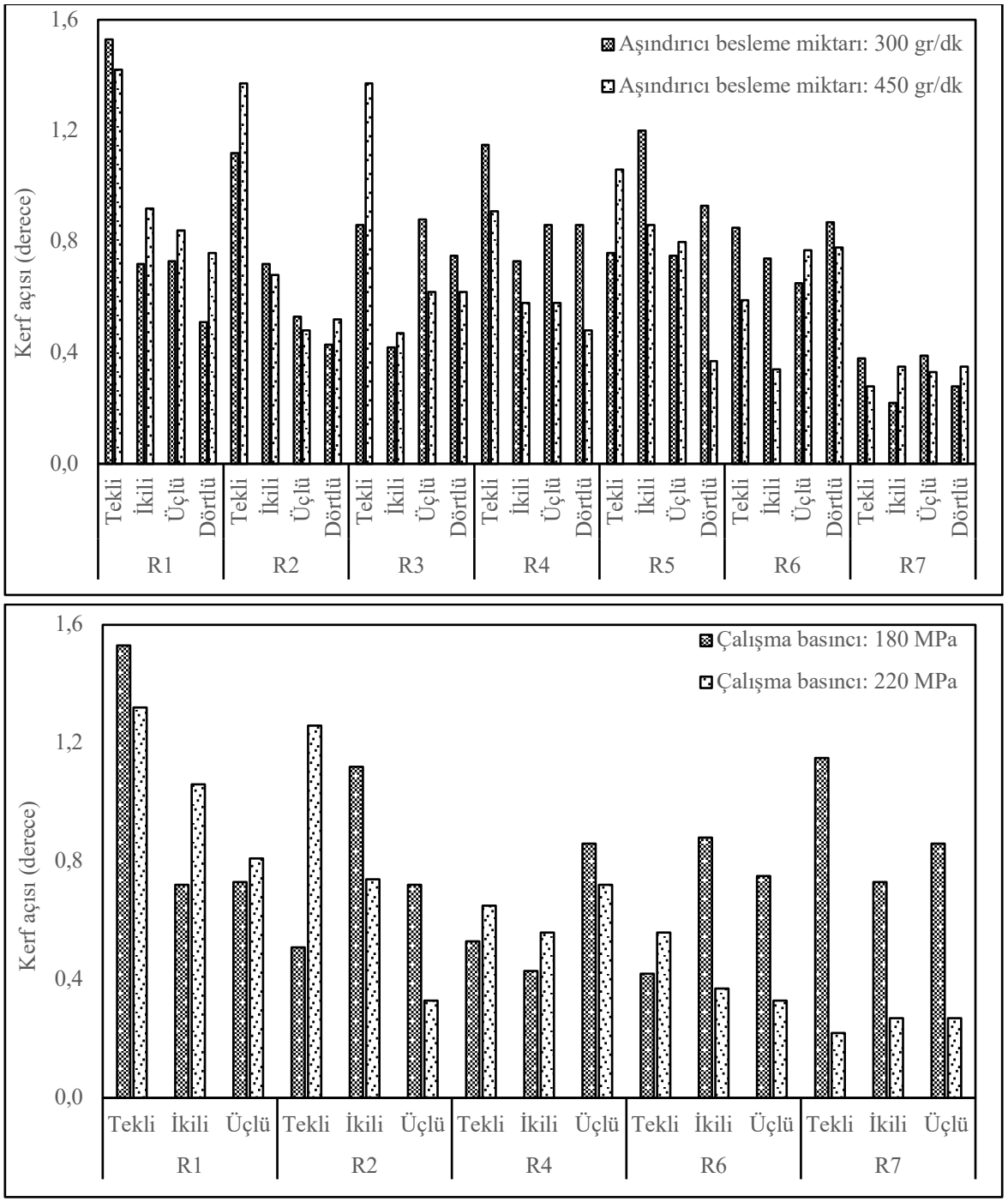
Şekil 7. Çok geçişli kesimde aşındırıcı besleme miktarı ve çalışma basıncı artışının kesme genişliği üzerindeki etkisi.

Şekil 8, kayaç türleri (R1–R7) için çok geçişli kesim deneylerinde kerf açısının geçiş sayısına bağlı değişimini göstermektedir. Genel olarak tek kesimlerde en yüksek kerf açıları elde edilirken, geçiş sayısı–ilerleme hızı eşleştirmesine dayalı çok geçişli kesme koşulları, kayaçların çoğunda kerf genişliğinin azalmasıyla sonuçlanmıştır. En belirgin azalma R1 numunesinde gözlenmiş olup, tek geçişte yaklaşık 1,53° iken dört geçiş sonunda 0,51°'ye düşmüş ve yaklaşık %67 oranında azalmıştır. Benzer şekilde R2 numunesinde kerf açısı 1,12°'den 0,43°'ye gerileyerek yaklaşık %62, R4 numunesinde ise 1,15°'den 0,85°'ye düşerek yaklaşık %26 azalma göstermiştir. R7 kayaç örneğinde de tek kesime göre dört kesimde yaklaşık %26 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Buna karşılık bazı kayaçlarda çok geçişli kesim kerf açısını azaltmak yerine artırmıştır.



Şekil 8. Çok geçişli kesim koşullarında kayaçlara ait kerf açısı değerleri.

Örneğin R5 numunesinde tek kesimde yaklaşık 0,76° olan kerf açısı iki kesimde 1,20°'ye yükselmiş ve yaklaşık %58 artış göstermiştir. Dört kesimde ise değer 0,93° olarak gerçekleşmiş ve tek kesime göre yaklaşık %22 daha yüksek kalmıştır. R6 kayaç örneğinde de dört kesimde ölçülen 0,87°'lik kerf açısı, tek kesimdeki 0,84° değerine kıyasla yaklaşık %4 oranında artmıştır. R3 numunesinde ise en yüksek değer üç kesimde elde edilmiş ve tek kesime göre yaklaşık %4'lük sınırlı bir artış gözlenmiştir. Özellikle R1 ve R5 örneklerinde elde edilen zıt eğilimler, çok geçişli kesmenin kerf açısı üzerindeki etkisinin kayaç türüne bağlı olduğunu açıkça göstermektedir. R5'teki en yüksek artış iki geçişli kesimde meydana gelmiş ve geçiş sayısının artırılması kerf açısında sürekli bir artış oluşturmamıştır. R5'in yüksek tek eksenli basınç dayanımı, nokta yük dayanımı ve mineral tane yoğunluğu değerleri ile sonraki geçişlerde ortaya çıkabilecek jet sapması, geri akış ve ikincil parçacık darbeleri, R1 ve R5'in farklı tepkiler vermesine katkıda bulunmuş olabilir. Ancak bu süreçler doğrudan ölçülmediğinden, burada sunulan mekanizma açıklamaları literatüre dayalıdır. Bu mekanizmaların doğrulanabilmesi için gelecekte yüksek hızlı görüntüleme, hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ve kesilmiş yüzeylerin mikro yapısal incelemeleriyle desteklenen çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Şekil 9'da sunulan sonuçlar, aşındırıcı besleme miktarının 300 g/dk'dan 450 g/dk'ya yükseltilmesinin kerf açısı üzerindeki etkisini göstermektedir. Genel olarak aşındırıcı besleme miktarındaki artış, kayaçların büyük çoğunluğunda kerf açısını artırmış ve bu durum özellikle tek kesimlerde daha belirgin olmuştur. R2 kayaç örneğinde tek kesimde kerf açısı yaklaşık 0,52°'den 1,38°'ye yükselerek yaklaşık %165, R3 örneğinde ise 0,50°'den 1,37°'ye çıkarak yaklaşık %174 oranında artmıştır. Benzer şekilde R5 numunesinde tek kesimde yaklaşık %38, R6 numunesinde yaklaşık %15 ve R7 numunesinde yaklaşık %14 artış meydana gelmiştir. Bununla birlikte bazı durumlarda aşındırıcı besleme miktarındaki artışın kerf açısını azalttığı görülmüştür. Örneğin R1 kayaç örneğinde tek kesimde yaklaşık %41, iki kesimde %14 ve üç kesimde %6 oranında azalma meydana gelmiştir. R4 kayaç örneğinde ise iki ve üç kesimlerde sırasıyla yaklaşık %31 ve %43 oranlarında düşüşler belirlenmiştir. Sonuçlar, yüksek aşındırıcı debisinin jetin aşındırma kapasitesini artırmasına rağmen, kerf geometrisine olan etkisinin kayaç yapısına ve geçiş sayısına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Çalışma basıncının 180 MPa'dan 220 MPa'ya yükseltilmesinin kerf açısı üzerindeki etkisinde ise genel eğilim, basınç artışının kerf açısını azaltması yönünde olmuştur. En belirgin düşüşler R7 ve R6 kayaçlarında gözlenmiştir.



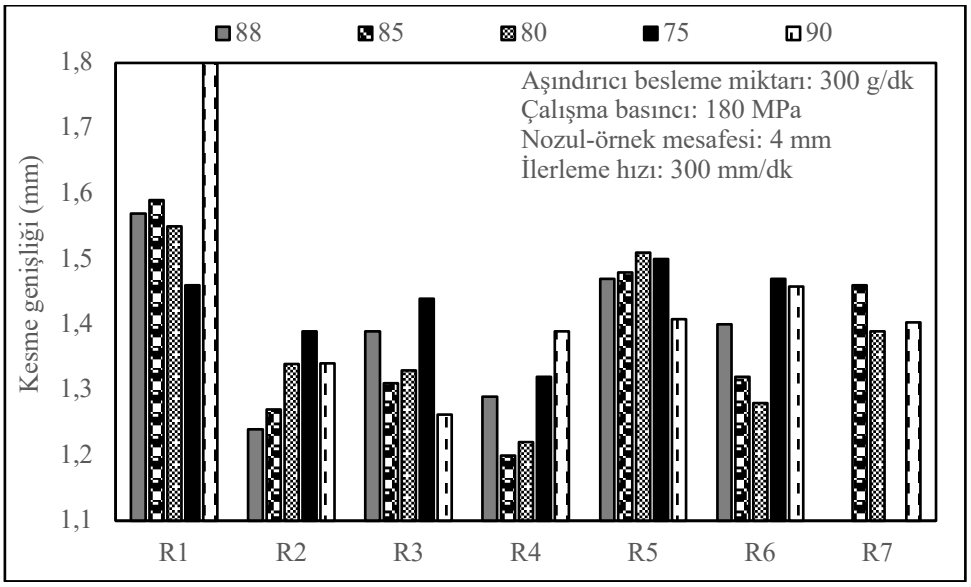
Şekil 9. Çok geçişli kesimde aşındırıcı besleme miktarı ve çalışma basıncı artışının kesim açısına etkisi.

R7 örneğinde tek, iki ve üç kesimlerde kerf açısı sırasıyla yaklaşık %81, %62 ve %68 oranında azalmıştır. Benzer şekilde R6 kayaç örneğinde tek kesimde yaklaşık %59, iki kesimde %52 ve üç kesimde %57 oranlarında azalma meydana gelmiştir. R2 kayaç örneğinde ise basınç artışı tek kesimde yaklaşık %42, iki kesimde %35 ve üç kesimde %54 oranında düşüş sağlamıştır. Buna karşılık bazı kayaçlarda farklı davranışlar gözlenmiştir. Örneğin R4 kayaç örneğinde tek kesimde kerf açısı yaklaşık %21, iki kesimde ise %35 oranında artarken, üç kesimde yaklaşık %17 oranında azalmıştır. R1 kayaç örneğinde de iki kesimde yaklaşık %48'lik bir artış meydana gelmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, çalışma basıncının artırılması jetin kinetik enerjisini yükselterek daha etkili ve daha doğrusal bir malzeme uzaklaştırma mekanizması oluşturmuş, böylece kerf açısını azaltarak daha düşük kerf açıları elde

edilmesini sağlamıştır. Ancak bazı kayaçlarda gözlenen farklı eğilimler, kerf açısının yalnızca jet enerjisine değil, aynı zamanda kayaçların mineralojik ve fizikomekanik özelliklerine de bağlı olduğunu göstermektedir

4.2. ASJ ileri açılı kesme tekniğinin kesme genişliğine ve kerf açısına etkisi

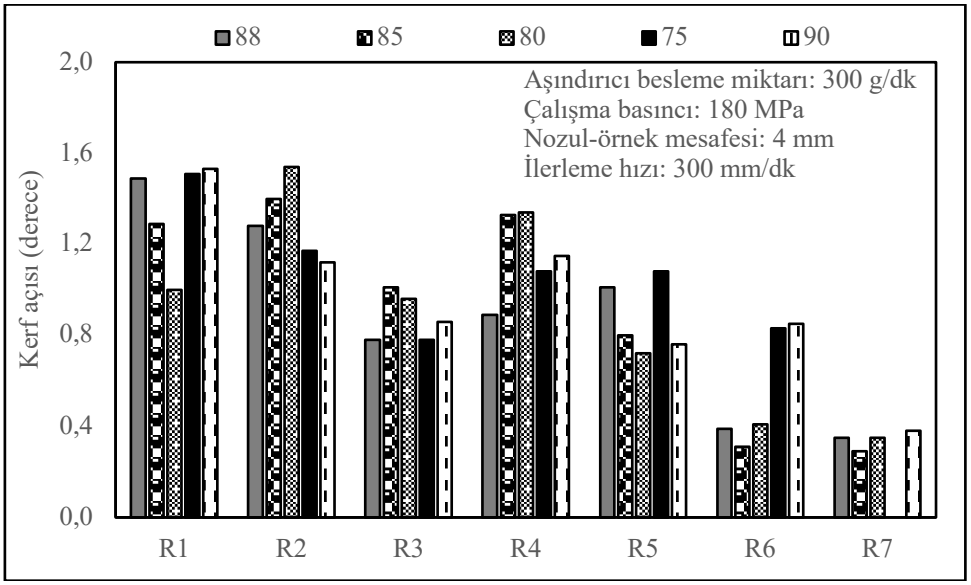
Şekil 10'da jet temas açısının (90°, 88°, 85°, 80° ve 75°) kesme genişliği üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Sonuçlar, ileri açılı kesimin kesme genişliğini kayaç türüne bağlı olarak değiştirdiğini ortaya koymaktadır. Genel olarak en yüksek kesme genişlikleri R1 ve R5 kayaçlarında elde edilirken, en düşük değerler R4 ve R2 kayaçlarında gözlenmiştir. R1 numunesinde kesme genişliği 75° açıda yaklaşık 1,46 mm iken, açı 90°'ye yükseltildiğinde yaklaşık 1,80 mm'ye ulaşmış ve yaklaşık %23'lük bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 10. İleri açılı kesim koşullarında kayaçlara ait kesme genişliği değerleri.

Benzer şekilde R4 kayaç örneğinde kesme genişliği 80° açıda yaklaşık 1,22 mm'den 90° açıda 1,40 mm'ye yükselerek yaklaşık %15 oranında artmıştır. Buna karşın bazı kayaçlarda maksimum kesme genişliği eğik açılarda elde edilmiştir. Örneğin R3 numunesinde en yüksek değer yaklaşık 1,44 mm ile 75° açıda ölçülmüş olup, bu değer 90°'de elde edilen 1,28 mm'lik değerden yaklaşık %13 daha yüksektir. R5 kayaç örneğinde ise tüm açılarda kesme genişliğinin 1,40–1,52 mm aralığında değiştiği ve açının etkisinin sınırlı kaldığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, jetin kayaç örnek yüzeyine eğik açıyla gönderilmesi, jet enerjisinin kesme yüzeyi boyunca farklı biçimde dağılmasına neden olmakta ve bunun sonucu olarak kesme genişliği kayaç türüne bağlı şekilde değişmektedir. Ancak kesme genişliğindeki değişimlerin çoğunlukla %5–20 aralığında kaldığı ve kayaç özelliklerinin etkisinin jet açısının etkisi kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır. Kesme genişliğine kıyasla jet açısının kerf açısı üzerinde daha belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 11). R1 ve R2 kayaçlarında en yüksek kerf açıları yaklaşık 1,55° ve 1,55° ile sırasıyla 90° ve 80° açılarında elde edilirken, en düşük değerler yaklaşık 1,00° ve 1,12° olarak ölçülmüştür. Bu durum, söz konusu kayaçlarda jet açısının değiştirilmesiyle kerf açısında yaklaşık %35–40'a varan değişimler meydana geldiğini göstermektedir. R5 kayaç örneğinde kerf açısı 0,75° ile 1,08° arasında değişmiş ve maksimum ile minimum değerler arasında yaklaşık %44'lük bir fark oluşmuştur. Buna karşılık R6 ve R7 kayaçları oldukça düşük kerf açıları sergilemiş olup, değerler sırasıyla yaklaşık 0,30–0,85° ve 0,30–0,38° aralığında kalmıştır. Özellikle R6 kayaç örneğinde 80° açıda elde edilen yaklaşık 0,30°'lik kerf açısı, 90° açıda ölçülen yaklaşık 0,85°'lik değere göre yaklaşık %65 daha düşük olup, ileri açılı kesimin kerf açısını önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir. Benzer şekilde R7 örneğinde kerf açısının tüm jet temas açılarında 0,40°'nin altında kalması, bu kayaçta daha paralel kerf duvarlarının oluştuğunu göstermektedir. Genel olarak ileri açılı kesimin kerf geometrisi üzerindeki etkisi kayaç türüne bağlı olarak değişmiş; bazı kayaçlarda kerf açısı belirgin biçimde azalırken diğerlerinde sınırlı, düzensiz veya ters yönlü değişimler gözlenmiştir. Dolayısıyla, test edilen herhangi bir açı seviyesi bütün kayaçlar için ortak bir optimum koşul olarak tanımlanamaz. Ayrıca, yalnızca 75°–90° aralığındaki ayrık açı seviyelerinin incelenmesi ve her

koşulun bağımsız olarak tekrarlanmaması nedeniyle en düşük kerf açısını veren deneysel seviye kesin bir optimum olarak değerlendirilmemelidir. Mevcut sonuçlar yalnızca incelenen aralıkta, jet temas açısına verilen kayaç türüne özgü tepkileri göstermektedir.



Şekil 11. İleri açılı kesim koşullarında kayaçlara ait kerf açısı değerleri.

4.3. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile kesme performans göstergeleri arasındaki ilişkiler

Tablo 4'te, kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile çok geçişli ve ileri açılı kesimlerden elde edilen ortalama kerf genişliği, ortalama kerf açısı ve bunlara ait yüzdesel değişimler arasındaki Spearman sıra korelasyonları sunulmuştur. Çok geçişli kesimde ortalama kerf genişliği ile incelenen kayaç özelliklerinin hiçbiri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir ($p>0.05$). Görece en yüksek pozitif korelasyonlar doğal su içeriği (X3; $r_s=0.522$, $p=0.228$) ve nokta yük dayanımı (X10; $r_s=0.468$, $p=0.288$) için elde edilmiş, ancak bu ilişkiler istatistiksel anlamlılık düzeyine ulaşmamıştır. Dolayısıyla çok geçişli kesimde ortalama kerf genişliğinin incelenen özelliklerden herhangi biri tarafından tek başına açıklanamadığı görülmüştür. Çok geçişli kesimde ortalama kerf açısı bakımından en belirgin ilişki mineral tane yoğunluğu (X6) için elde edilmiştir. X6 ile ortalama kerf açısı arasında güçlü ve pozitif bir ilişki belirlenmiştir ($r_s=0.857$, $p=0.013$). Bu sonuç, mineral tane yoğunluğu yüksek kayaçların çok geçişli kesim sırasında daha yüksek kerf açısı gösterme eğiliminde olduğuna işaret etmektedir. Doğal yoğunluk da ortalama kerf açısıyla güçlü pozitif bir ilişki göstermiştir (X5; $r_s=0.750$); ancak bu ilişki istatistiksel anlamlılık sınırının hemen üzerinde kalmıştır ($p=0.052$). Tek eksenli basınç dayanımıyla elde edilen pozitif ilişki ise orta düzeyde ve istatistiksel olarak anlamlı değildir (X11; $r_s=0.642$, $p=0.119$). İleri açılı kesimde ortalama kerf genişliği ile kayaç özelliklerinin hiçbiri arasında anlamlı bir ilişki bulunmamıştır ($p>0.05$). Ortalama kerf genişliğiyle görece en yüksek pozitif ilişkiler doğal su içeriği (X3; $r_s=0.594$, $p=0.159$), doygunluk derecesi (X4; $r_s=0.522$, $p=0.228$) ve nokta yük dayanımı (X10; $r_s=0.486$, $p=0.268$) için elde edilmiştir. Bununla birlikte, bu katsayılar yalnızca eğilim düzeyinde kalmıştır. İleri açılı kesimde ortalama kerf açısı, kayaçların su içeriği ve gözenek yapısıyla ilişkili özellikleriyle daha belirgin ilişkiler göstermiştir. Bir başka deyişle; ortalama kerf açısı ile su emme kapasitesi (X1; $r_s=-0.821$, $p=0.023$), efektif su emme oranı (X2; $r_s=-0.892$, $p=0.004$), doğal su içeriği (X3; $r_s=-0.785$, $p=0.036$), efektif porozite (X7; $r_s=-0.821$, $p=0.023$) ve boşluk oranı (X8; $r_s=-0.821$, $p=0.023$) arasında güçlü negatif ilişkiler belirlenmiştir. Buna karşılık, P-dalga hızıyla güçlü pozitif bir ilişki elde edilmiştir (X12; $r_s=0.821$, $p=0.023$). Bu bulgular, daha yüksek su emme ve gözeneklilik özelliklerine sahip kayaçların ileri açılı kesimde daha düşük ortalama kerf açısı gösterme eğiliminde olduğunu; daha yüksek P-dalga hızına sahip, görece daha sıkı ve bütünlüklü kayaçlarda ise kerf açısının artabileceğini düşündürmektedir. Doğal yoğunluk ile ortalama kerf açısı arasındaki pozitif ilişki de güçlü olmakla birlikte istatistiksel anlamlılık sınırının hemen üzerinde kalmıştır (X5; $r_s=0.750$, $p=0.052$). Öte yandan; yüzdesel değişimler incelendiğinde, çok geçişli kesimde kerf genişliği ve kerf açısındaki değişimler ile kayaç özellikleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamıştır.

Tablo 4. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile çok geçişli ve ileri açılı kesim performansı arasındaki ilişkiye yönelik Spearman sıra korelasyon analizi sonuçları

			X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13
Çoklu kesim	KG_{ort}	r_s	0.342	0.036	0.522	0.306	-0.126	-0.018	0.342	0.342	-0.216	0.468	-0.072	-0.306	0.306
		p	0.452	0.938	0.228	0.504	0.787	0.969	0.452	0.452	0.641	0.288	0.877	0.504	0.504
	KA_{ort}	r_s	-0.428	-0.535	-0.214	0.535	0.75	0.857	-0.428	-0.428	0.5	0.5	0.642	0.464	0.535
		p	0.337	0.215	0.644	0.215	0.052	0.013	0.337	0.337	0.253	0.253	0.119	0.293	0.215
İleri açılı kesim	KG_{ort}	r_s	0.324	0.018	0.594	0.522	-0.090	0.054	0.324	0.324	-0.0360	0.486	-0.090	-0.180	0.216
		p	0.477	0.969	0.159	0.228	0.847	0.908	0.477	0.477	0.938	0.268	0.847	0.699	0.641
	KA_{ort}	r_s	-0.821	-0.892	-0.785	0.428	0.75	0.642	-0.821	-0.821	0.714	0.571	0.714	0.821	0.642
		p	0.023	0.004	0.036	0.337	0.052	0.119	0.023	0.023	0.071	0.180	0.071	0.023	0.119
Çoklu kesim	% değişim[1]	r_s	0.642	0.607	0.75	-0.214	-0.535	-0.25	0.642	0.642	-0.214	0.178	-0.357	-0.642	-0.178
		p	0.119	0.148	0.052	0.644	0.215	0.588	0.119	0.119	0.644	0.701	0.431	0.119	0.701
	% değişim[2]	r_s	0.428	0.464	0.428	-0.321	-0.178	0.142	0.428	0.428	0.0	0.071	0.142	-0.464	0.107
		p	0.337	0.293	0.337	0.482	0.701	0.759	0.337	0.337	1.0	0.879	0.759	0.293	0.819
İleri açılı kesim	% değişim[3]	r_s	0.0	0.178	-0.321	-0.785	-0.214	-0.178	0.0	0.0	0.0	-0.071	0.178	-0.214	0.142
		p	1.0	0.701	0.482	0.036	0.644	0.701	1.0	1.0	1.0	0.879	0.701	0.644	0.759
	% değişim[4]	r_s	-0.018	-0.036	0.018	0.036	0.252	0.252	-0.018	-0.018	-0.198	-0.090	0.126	-0.054	0.090
		p	0.969	0.938	0.969	0.938	0.585	0.585	0.969	0.969	0.670	0.847	0.787	0.908	0.847

Bununla birlikte, kerf genişliğindeki yüzdesel değişim ile doğal su içeriği arasındaki güçlü pozitif ilişki anlamlılık sınırına oldukça yakın bulunmuştur (X3; r_s=0.750, p=0.052). İleri açılı kesimde ise kerf genişliğindeki yüzdesel değişim ile doygunluk derecesi arasında güçlü negatif bir ilişki belirlenmiştir (X4; r_s=−0.785, p=0.036). Bu durum, doygunluk derecesi yükseldikçe jet temas açısındaki değişime bağlı kerf genişliği değişiminin azalma eğilimi

gösterebileceğine işaret etmektedir. İleri açılı kesimde kerf açısındaki yüzdesel değişim ile incelenen kayaç özellikleri arasında ise anlamlı bir ilişki tespit edilmemiştir. Genel olarak korelasyon sonuçları, ortalama kerf genişliğinin incelenen kayaç özellikleriyle sınırlı ilişkiler gösterdiğini, buna karşılık özellikle ileri açılı kesimde ortalama kerf açısının kayaçların su emme, gözeneklilik ve elastik dalga iletim özellikleriyle daha yakından ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, çalışma yalnızca yedi kayaç türünü kapsadığından ve bazı özellikler birbiriyle ilişkili olduğundan, belirlenen korelasyonlar doğrudan neden-sonuç ilişkileri olarak değerlendirilmemelidir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, yedi farklı doğal taşın ASJ ile işlenmesinde çok geçişli ve ileri açılı kesim stratejilerinin kesme genişliği ve kerf açısı üzerindeki etkileri toplam 98 kesme deneyi üzerinden incelenmiştir. Elde edilen bulgular, her iki kesim stratejisinin kerf geometrisi üzerindeki etkisinin kayaç türüne ve uygulanan çalışma koşullarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Bu nedenle, bütün kayaçlar için geçerli tek bir kesim stratejisi veya işlem parametresi önerilememiştir. Bununla birlikte; çok geçişli kesim, incelenen kayaçların çoğunda kesme genişliğini tek geçişe göre %0,7–20,3 oranında azaltmıştır. En yüksek azalma yaklaşık %20,3 ile R4'te elde edilirken R3'te kerf genişliği yaklaşık %4,8 artmıştır. Kerf açısı bakımından en belirgin iyileşmeler R1 ve R2'de gözlenmiştir. R1'de kerf açısı 1,53°'den 0,51°'ye düşerek yaklaşık %67, R2'de ise 1,12°'den 0,43°'ye gerileyerek yaklaşık %62 azalmıştır. Ayrıca, çok geçişli kesim bütün kayaçlarda aynı yönde bir sonuç oluşturmamıştır. Özellikle R5'te kerf açısı tek geçişte 0,76° iken iki geçişte 1,20°'ye yükselmiş ve yaklaşık %58 artmıştır; dört geçiş sonunda ise 0,93° olarak ölçülerek başlangıç değerinin yaklaşık %22 üzerinde kalmıştır.

Aşındırıcı besleme miktarının 300 g/dk'dan 450 g/dk'ya artırılması, çoğu kayaçta kesme genişliğini yaklaşık %2–24 oranında artırmış; ancak bazı kayaçlarda sınırlı veya ters yönlü değişimler meydana getirmiştir. Çalışma basıncının 180 MPa'dan 220 MPa'ya yükseltilmesi ise kesme genişliğinde kayaç türüne bağlı olarak %26'ya varan azalmalar veya %28'e ulaşan artışlar oluşturmuştur. Kerf açısı açısından basınç artışı özellikle R6 ve R7'de belirgin azalmalar sağlamış, ancak bu eğilim de bütün kayaçlarda ve geçiş seviyelerinde düzenli biçimde gözlenmemiştir. İleri açılı kesim deneyleri, jet temas açısının kesme genişliğinden çok kerf açısı üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Bazı kayaçlarda kerf açısında yaklaşık %35–65 azalma elde edilirken, diğer kayaçlarda daha sınırlı veya düzensiz değişimler görülmüştür. Örneğin R6'da 90°'de yaklaşık 0,85° olan kerf açısı, 80°'de yaklaşık 0,30°'ye düşmüştür. Bununla birlikte, benzer bir iyileşme bütün kayaçlarda aynı jet temas açısında elde edilmemiştir. Spearman sıra korelasyon analizi, kesme genişliğinin incelenen fiziksel ve mekanik kayaç özelliklerinden herhangi biriyle tek başına güçlü ve istatistiksel olarak anlamlı biçimde açıklanamadığını göstermiştir. Buna karşılık, çok geçişli kesimde ortalama kerf açısı ile mineral tane yoğunluğu arasında güçlü pozitif bir ilişki belirlenmiştir (r_s=0,857; p=0,013). Ancak bu sonuç, yalnızca yedi kayaç türüne dayandığından keşifsel bir bulgu olarak değerlendirilmeli ve daha geniş kayaç örneklemleriyle doğrulanmalıdır. İleri açılı kesimde ortalama kerf açısı; su emme kapasitesi, efektif su emme oranı, doğal su içeriği, efektif porozite ve boşluk oranıyla güçlü negatif, P-dalga hızıyla güçlü pozitif ilişkiler göstermiştir. İleri açılı kesimde kerf genişliğindeki yüzdesel değişim ile doygunluk derecesi arasında da güçlü negatif bir ilişki elde edilmiştir (r_s=−0,785; p=0,036).

Endüstriyel uygulama açısından bulgular, ASJ kesiminde bütün doğal taşlar için geçerli sabit bir parametre reçetesi kullanılmasının uygun olmadığını göstermiştir. Çok geçişli kesim, kerf açısının azaltılmasının öncelikli olduğu ve bu stratejiye olumlu tepki veren kayaçlarda daha paralel kesim yüzeyleri elde etmek için kullanılabilirken, R5 benzeri davranış gösteren yüksek dayanımlı kayaçlarda geçiş sayısının artırılması kerf kalitesini iyileştirmeyebilir. Benzer şekilde, ileri açılı kesim ve yüksek çalışma basıncı yalnızca ön denemelerle uygunluğu doğrulanan kayaçlarda uygulanmalıdır. Bu nedenle endüstriyel parametre seçimi; kayaçların su emme, porozite, yoğunluk, dayanım ve P-dalga hızı gibi özelliklerinin önceden belirlenmesi, sınırlı sayıda pilot kesim yapılması ve kesme genişliği ile kerf açısının birlikte değerlendirilmesi temelinde gerçekleştirilmelidir. Böyle bir yaklaşım, gereksiz geçişlerin ve aşındırıcı tüketiminin önlenmesine, işlem süresinin azaltılmasına ve ürün geometrisinin daha kontrollü biçimde elde edilmesine katkı sağlayabilir.

6. Çalışmanın Sınırlılıkları ve Öneriler

Çalışma sonuçları genel olarak, çok geçişli ve ileri açılı kesim stratejileri uygun koşullarda düşük kesme genişlikleri ve daha paralel kerf duvarları elde edilmesine yol açabileceğini göstermiştir. Ancak, mevcut sonuçlar değerlendirilirken bazı sınırlılıklar dikkate alınmalıdır. Çalışma yedi kayaç türüyle sınırlı olup her deney koşulu yalnızca bir bağımsız kesme deneyi ile temsil edilmiştir. Jet temas açısı ayrık seviyelerde incelenmiş, işlem parametreleri tam faktöriyel bir deney tasarımı kapsamında birlikte değiştirilmemiştir. Bu nedenle kesin optimum

parametre kombinasyonlarının belirlenmesi ve sonuçların bütün doğal taşlara genellenmesi mümkün değildir. Bir başka deyişle, bu tekniklerin etkinliği kayaç türüne göre değişebileceği unutulmamalıdır. Ayrıca kerf içi akış, jet sapması, geri akış, mikro çatlak oluşumu ve tane kopması gibi mekanizmalar doğrudan ölçülmediğinden, bunlara ilişkin açıklamalar literatür temelli olası yorumlar olarak değerlendirilmelidir. Gelecekte daha geniş kayaç grupları, bağımsız deney tekrarları ve çok ölçütlü optimizasyon tasarımlarının kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, yalnızca kerf açısının veya kesme genişliğinin en düşük olduğu koşulun optimum kabul edilmesi yeterli olmayacaktır. Kesme derinliği, yüzey pürüzlülüğü, malzeme uzaklaştırma oranı, aşındırıcı tüketimi, enerji tüketimi ve işlem kararlılığı gibi ölçütlerin de değerlendirmeye katılması gerekmektedir. Gelecekteki çalışmalarda daha fazla kayaç türünün kullanılması, her deney koşulunun bağımsız olarak tekrarlanması ve açı seviyelerinin daha dar aralıklarla incelenmesi önerilmektedir. Böylece deneysel değişkenlik istatistiksel olarak değerlendirilebilir ve kayaç türüne özgü uygun işlem aralıkları daha güvenilir biçimde belirlenebilir. Bu tür çalışmalar, mevcut çalışmada yalnızca literatüre dayalı olası açıklamalar olarak tartışılan mekanizmaların doğrulanmasına ve ASJ ile doğal taş işlemenin çok ölçütlü olarak optimize edilmesine katkı sağlayacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, bir doktora tez projesi (Proje No: FDK-2022-10526) kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle yazarlar, sağladığı finansal destekten dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve doğaltaş örneklerinin temin edilmesindeki katkılarından dolayı Bursa'da faaliyet gösteren Çiftyıldız Marble Group'a içtenlikle teşekkür ederler.

Kaynaklar

[1] Aydin G, Karakurt I, Aydiner K. Prediction of cut depth of the granitic rocks machined by abrasive waterjet (AWJ). Rock Mech Rock Eng 2013; 46 (5): 1223-1235. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0307-1

[2] Pawar JP, Vidhate SU, Khalkar YM. Improving the quality characteristics of abrasive water jet machining of marble material using multi-objective artificial bee colony algorithm. *J Comput Des Eng* 2018; 5: 319–328. https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.12.002

[3] Wang H, Yuan R, Zhang X, Zai P, Deng J. Research progress in abrasive water jet processing technology. Micromachines 2023; 14: 1526. https://doi.org/10.3390/mi14081526

[4] Wang J, Guo DM. The cutting performance in multipass abrasive waterjet machining of industrial ceramics. J Mater Process Technol 2003; 133: 371–377. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01125-1

[5] Hashish M. Precision cutting of thick materials with AWJ. In: Proceedings of the 17th International Conference on Water Jetting; 7–9 September 2004; Mainz, Germany, pp. 33–45.

[6] Wang J, Zhong Y. Enhancing the depth of cut in abrasive waterjet cutting of alumina ceramics by using multipass cutting with nozzle oscillation. Mach Sci Technol 2009; 13(1): 76–91. https://doi.org/10.1080/10910340902776085

[7] Lemma E, Deam R, Chen L. Maximum depth of cut and mechanics of erosion in AWJ oscillation cutting of ductile materials. J Mater Process Technol 2005; 160: 188–197. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.06.010

[8] Wang J. Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics. Int J Mech Sci 2007; 49: 306–316. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2006.09.005

[9] Shanmugam DK, Wang J, Liu H. Minimisation of kerf tapers in abrasive waterjet machining of alumina ceramics using a compensation technique. Int J Mach Tools Manuf 2008; 48: 1527–1534. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.07.001

[10] Wang J. Depth of cut models for multipass abrasive waterjet cutting of alumina ceramics with nozzle oscillation. Front *Mech* Eng 2010; 5(1): 19–32. https://doi.org/10.1007/s11465-009-0082-1

[11] Dekster L, Karkalos EN, Obratanski KP. et al. Evaluation of the machinability of Ti-6Al-4V titanium alloy by AWJM using a multipass strategy. Appl Sci 2023; 13: 3774. https://doi.org/10.3390/app13063774

[12] Karakurt I, Aydin G, Yıldırım F, Kaya S. Aşındırıcı Sujeti Kesme Performansının İyileştirilmesine Yönelik Geliştirilen Yöntemler. Türkiye 26. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi; 16-19 Nisan 2019; Antalya, Türkiye, v.1: pp. 1340-1345.

[13] Khanna R, Gupta R, Gupta,V. Measuring material removal rate of marble by using abrasive water jet machining. IOSR J Mech Civ Eng 2011; 45–49.

[14] Shah RV, Patel DM. A study of abrasive water jet machining process on granite material. Int J Eng Res Appl 2012; 2(4): 2031–2033.

[15] Karakurt I, Aydin G, Aydiner K. An investigation on the kerf width in abrasive waterjet cutting of granitic rocks. Arab J Geosci 2014; 7(7): 2923–2932. https://doi.org/10.1007/s12517-013-0984-4

[16] Mlynarczuk M, Skiba M, Sitek L, Hlavac P, Hlavacek P, Kozusnikova A. The research into the quality of rock surfaces obtained by abrasive water jet cutting. Arch Min Sci 2014; 59(4): 925–940. https://doi.org/10.2478/amsc-2014-0064

[17] Abdullah R, Mahrous A, Barakat A. Surface quality of marble machined by abrasive waterjet. Cogent Eng 2016; 3(1): 1178626. https://doi.org/10.1080/23311916.2016.1178626
[18] Oh TM, Cho GC. Rock cutting depth model based on kinetic energy of abrasive waterjet. Rock Mech Rock Eng 2016; 49(3): 1059–1072. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0778-y
[19] Oh T, Joo G, Cha Y, Cho G. Effect of garnet characteristics on abrasive waterjet cutting of hard granite rock. Adv Civ Eng 2019; 5732649. https://doi.org/10.1155/2019/5732649
[20] De Abreu E, Lima CE, Lebron R. et al. Study of influence of traverse speed and abrasive mass flowrate in abrasive water jet machining of gemstones. J Adv Manuf Technol 2016; 83: 77–87. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7529-9
[21] Alsoufi M, Suker D, Alhazmi M, Azam S. Influence of abrasive waterjet machining parameters on the surface texture quality of Carrara marble. J Surf Eng Mater Adv Technol 2017; 7: 25–37. https://doi.org/10.4236/jsemat.2017.72003
[22] Zhao J, Zhang G, Xu Y. et al. Mechanism and effect of jet parameters on particle waterjet rock breaking. Powder Technol 2017; 313: 231–244. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.026
[23] Aydin G, Kaya S, Karakurt I. Utilization of solid-cutting waste of granite as an alternative abrasive in abrasive waterjet cutting of marble. J Clean Pro 2017; 159: 241–247. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.173
[24] Jiang H, Liu Z, Gao K. Numerical simulation on rock fragmentation by discontinuous water-jet using coupled SPH/FEA method. Powder Technol 2017; 312: 248–259. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.047
[25] Arab BP, Celestino BT. A microscopic study on kerfs in rocks subjected to abrasive waterjet cutting. Wear 2020; 448–449: 203210. https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203210
[26] Tripathi R, Hloch S, Chattopadhyaya S. et al. Application of the pulsating and continuous water jet for granite erosion. Int J Rock Mech Min Sci 2020; 126: 104209. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104209
[27] Aydin G, Kaya S, Karakurt I. Effect of abrasive type on marble cutting performance of abrasive waterjet. Arab J Geosci 2019; 2(11): 356–363. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4475-0
[28] Kaya S, Aydin G, Karakurt I. An experimental study on the cutting depth produced by abrasive waterjet: How do abrasive and rock properties affect the cutting process? J Adv Manuf Technol 2023; 2: 123: 4811–4823. https://doi.org/10.1007/s00170-023-11053-5
[29] Xiao S, Wang P, Hang G, Soulat D. A study of abrasive waterjet multi-pass cutting on kerf quality of carbon fiber-reinforced plastics. Int J Adv Manuf Technol 2019; 105: 4527–4537. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3177-1
[30] Cha Y, Kim WJ, Kim SJ. et al. Assessment of abrasive impact frequency depending on the traverse rate in waterjet rock cutting. In Proceedings of the 2021 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM21); 23–26 August 2021a; Gece, Seoul, Korea, pp. 1-8.
[31] Aydin G, Karakurt I, Amiri RM. et al. Improvement of rock cutting performance through two-pass abrasive waterjet cutting. Sustainability 2022; 14(19): 12704. https://doi.org/10.3390/su141912704
[32] Ge Z, Shangguan J, Zhou Z. et al. Investigation of fracture damage and breaking energy consumption of hard rock repeatedly cut by abrasive waterjet. Rock Mech Rock Eng 2023; 56: 3215–3230. https://doi.org/10.1007/s00603-023-03230-5
[33] Cha Y, Lee LH, Kim SJ, Oh MT. Granite cutting performance depending on the traverse speed in abrasive waterjet multi-cutting. J Adv Manuf Technol 2024; 132: 3771–3783. https://doi.org/10.1007/s00170-024-13571-2
[34] Cha Y, Oh MT, Hwang JH. et al. Simple approach for evaluation of abrasive mixing efficiency for abrasive waterjet rock cutting. Appl Sci 2021b; 11: 1543. https://doi.org/10.3390/app11041543
[35] Li L, Wang F, Li T. et al. The effects of inclined particle water jet on rock failure mechanism: Experimental and numerical study. J Pet Sci Eng 2020; 185,: 106639. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106639
[36] Liu J, Zhu Y, Du S. Failure mechanism and effect of nozzle parameters on abrasive water jet rock breaking. Shock and Vib 2021; 1–14. https://doi.org/10.1155/2021/6621255
[37] Li XF, Li HB, Zhang GK. et al. Rate dependency mechanism of crystalline rocks induced by impacts: Insights from grain-scale fracturing and micro heterogeneity. Int J Impact Eng 2021; 155: 103855. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2021.103855
[38] Barabas S, Florescu A. Reduction of cracks in marble appeared at hydro-abrasive jet cutting using the Taguchi method. Materials 2022; 15(2): 486. https://doi.org/10.3390/ma15020486
[39] Perec A, Radomska-Zalas A, Fajdek-Bieda A. Experimental research into marble cutting by abrasive water jet. Mech Eng 2022; 20: 145–156. https://doi.org/10.22190/FUME210203037P
[40] Chomka G, Kasperowicz M, Chodór J. et al. Possibilities of rock processing with a high-pressure abrasive waterjet with an aspect terms to minimizing energy consumption. Materials 2023; 16: 647. https://doi.org/10.3390/ma16020647
[41] Fan C, Zhang H, Kang Y. et al. Rock breaking performance of the newly proposed unsubmerged cavitating abrasive waterjet. Int J Min Sci Technol 2023; 33: 843–853. https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2023.04.003
[42] Liu F, Wang Y, Huang X. Cutting efficiency of extremely hard granite by high-pressure water jet and prediction model of cutting depth based on energy method. Bull Eng Geol Environ 2024; 83: 95. https://doi.org/10.1007/s10064-024-03586-0
[43] Wang C, Zhang J, Ma C. et al. Experimental study on the performance and mechanism of high-pressure abrasive waterjet cutting hard rock. Geotech Geol Eng 2024; 42: 3471–3489. https://doi.org/10.1038/s41598-025-27016-7
[44] Aydin G, Amiri RM, Kaya S, Karakurt I. Utilisation of glass waste as an abrasive in abrasive waterjet machining. P I Mech Eng C: J Mech Eng Sci 2025; 239(22): 9332 – 9346. https://doi.org/10.1177/09544062251370573

[45] Rogai I, Karakurt I, Aydin G, Karabacak EY, Roudini A, Avci DB. Modeling and optimization of the declineation angle generated by abrasive waterjet multi – pass and forward angling cuttings using machine learning. P I Mech Eng E-J Pro 2025a; https://doi.org/10.1177/09544089251382 (Baskıda)

[46] Rogai I, Karakurt I, Aydin G, Karabacak EY, Avci DB, Kaya S. An investigation into the abrasive waterjet cutting of rocks: Improving the cutting performance and leveraging the machine learning algorithms for modelling. Min Metall Explor 2025b; 42: 2943–2962. https://doi.org/10.1007/s42461-025-01342-w

[47] Kaya S, Aydin G, Karakurt I. Influence of workpiece and abrasive characteristics on material removal rate in abrasive waterjet cutting of rock. Min Metall Explor 43: 2141–2155 2026. https://doi.org/10.1007/s42461-026-01532-0

[48] Aydin G, Sahinoglu E, Rogai I, Karakurt I, Kaya S.Indirect grinding-based approach for brittleness comparison of various abrasives. P I Mech Eng E-J Pro 2026; https://doi.org/10.1177/09544089251382 (Baskıda).

[49] ISRM. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006 (Eds. Ulusay, R., & Hudson, J.A.). Kozan Ofset, Ankara, 2007; 628 s.

[50] EN 14157: Natural stone test methods – Determination of the abrasion resistance. CEN European Committee for Standardization, Brussels, Belgium 2017.