

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL TAŞ KESMEDE ALTERNATİF AŞINDIRICILARIN
PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Maden Yük. Müh. Serkan KAYA

**AĞUSTOS 2022
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL TAŞ KESMEDE ALTERNATİF AŞINDIRICILARIN
PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ**

Maden Yük. Müh. Serkan KAYA

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 /07 /2022

Tezin Savunma Tarihi : 22 /08 /2022

Tez Danışmanı :Prof. Dr. Gökhan AYDIN

Trabzon 2022

ÖNSÖZ

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

Tez danışmanlığımı üstlenerek gerek konu seçimimde ve çalışmalarım gereke eğitim hayatım dışındaki problemlerimde bilgi ve tecrübesiyle her an desteğini esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Gökhan AYDIN'a teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım boyunca yaptığım işlemlerde referans ve yardımcı olan, sık sık bilgi ve desteğine başvurduğum, tez izleme komitesinin değerli üyeleri Prof. Dr. İzzet KARAKURT ve Prof. Dr. Bülent ÖZTÜRK'e minnetlerimi sunarım. Davetimizi kırmayarak tez savunma sınavında görev alan jüri üyeleri Prof. Dr. Suphi URAL ve Doç. Dr. Didem EREN SARICI'ya ayrıca teşekkür ederim. Bölüm laboratuvar imkânlarından yararlanmamı sağlayan, Bölüm Başkanımız Prof. Dr. İbrahim ALP'e; SEM görüntüleri için K.T.Ü. Merkezi Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına ve Öğr. Gör. Ümit ÖZSANDIKCIOĞLU'na; çalışmalarım süresince yardım ve bilgilerini benden esirgemeyen, bölümümüz öğretim üyeleri Doç. Dr. Ferdi CİHANGİR ve Doç. Dr. Kadir KARAMAN'a; çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Serkan İNAL, Arş. Gör. Taha BOYRAZ ve Arş. Gör. Melek Hanım BEŞER'e, bölümümüz idari personellerinden Ahmet Salih BORAN ile İsmail USTA'ya özellikle teşekkürlerimi sunarım.

Aşındırıcılı Su Jeti kesme makinesini kullanarak deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Eminler Granit Mermer Mad. Oto. İnş. Gıda San. ve Tic. Ltd. Şti. yetkilileri ile operatör Emre AKAN'a; kayaç numunelerin teminini sağlayan Talip KILIÇ, Turan Bekişoğlu Mermer San. ve Tic. A.Ş. çalışanları ve değerli dostum Endüstri Mühendisi Onur AKALIN'a; aşındırıcı malzemeleri temin ettiğim Kuhmichel Abrasives çalışanları ve Habib AYKOL, Zımaş Zımpara ve Değirmen Taşı Sanayii A.Ş., Dakduklu Madencilik'e; XRF ve Mineralojik Analizler için de Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Analiz Laboratuvarları'na teşekkür ederim.

Kıymetli eşim Deniz GÜNEY KAYA'ya, hayatım boyu maddi ve manevi anlamda her zaman yanımda olan aileme ve değerli dostlarıma en derin şükranlarımı sunarım.

Serkan KAYA

Trabzon 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Aşındırıcılı Su Jeti ile Doğal Taş Kesmede Alternatif Aşındırıcıların Performanslarının Deneysel İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gökhan AYDIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/08/2022

Serkan KAYA

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XV
SEMBOLLER DİZİNİ	XVIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Doğal Taşlar ve Madenciligi	3
1.3. Doğal Taş Kesme Yöntemleri	3
1.3.1. Geleneksel ve Modern Doğal Taş Kesme Yöntemleri	4
1.3.2. İleri Kesme Teknolojileri.....	6
1.3.2.1. Lazer ile Kesme	8
1.3.2.2. Plazma Ark	9
1.3.2.3. Elektron Demeti.....	9
1.3.2.4. İyon Demeti	9
1.3.2.5. Ultrasonik Yöntem	10
1.3.2.6. Aşındırıcılı Jet	10
1.4. ASJ Teknolojisi	10
1.4.1. Su Jeti Tarihçesi.....	13
1.4.2. ASJ Bileşenleri ve Çalışma Mekanizması	14
1.4.3. ASJ ile Kesme Mekanığı	17
1.4.4. Kesme Performans Ölçütleri.....	21
1.4.4.1. Kerf Açısı	21
1.4.4.2. Kesme Genişliği ve Derinliği	22
1.4.4.3. Yüzey Pürüzlülüğü-Dalgallılığı.....	23
1.4.5. ASJ'nin Kesme Performansını Etkileyen Faktörler	25

1.4.5.1. Kesme Parametreleri	25
1.4.5.2. Aşındırıcı Tipi ve Özellikleri.....	29
1.4.5.3. Numunenin Özellikleri	31
1.4.5.4. Diğer	33
1.4.6. Aşındırıcılar	33
1.5. Literatür Özeti	35
1.6. Tez Çalışmasının Kapsamı ve Amacı.....	39
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
2.1. Materyaller	42
2.1.1. Aşındırıcılar	42
2.1.2. Kayaçlar.....	45
2.2. ASJ Deney Düzenegi ve Kesim Metotları.....	57
2.3. Kesme Performans Ölçümleri	63
3. BULGULAR VE İRDELEME	71
3.1. Kesme ve Kesme-Aşınma Derinliği.....	71
3.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme Derinliğine Etkileri.....	73
3.1.2. Kayaç Özelliklerinin Kesme Derinliğine Etkileri	78
3.1.3. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme-Aşınma Derinliğine Etkileri.....	89
3.1.4. Kayaç Özelliklerinin Kesme-Aşınma Derinliğine Etkileri.....	91
3.1.5. Kesme-Aşınma Derinliği/Kesme Derinliği Oranı	93
3.1.6. Kesme Derinliğinin Tahminine Yönelik Gerçekleştirilen Regresyon Analizleri...	94
3.1.6.1. Kesme-Aşınma Derinliğine Bağlı Olarak Kesme Derinliğinin Tahmini	94
3.1.6.2. Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Bağlı Olarak Kesme Derinliğinin Tahmini.....	98
3.2. Malzeme Uzaklaştırma Oranı.....	103
3.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Malzeme Uzaklaştırma Oranına Etkileri.....	103
3.2.2. Kayaç Özelliklerinin Malzeme Uzaklaştırma Oranına Etkileri.....	108
3.2.3. Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Bağlı Olarak Malzeme Uzaklaştırma Oranının Tahmini	117
3.3. Kesme Genişliği	120
3.3.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme Genişliğine Etkileri	121
3.3.2. Kayaç Özelliklerinin Kesme Genişliğine Etkileri	126
3.4. Kerf Geometrisi	135
3.4.1. Kerf Açısı	135
3.4.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kerf Açıklarına Etkileri.....	137

3.4.1.2. Kayaç Özelliklerinin Kerf Açılarına Etkileri.....	144
3.4.2. Çakılma Bölgesi	162
3.4.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Çakılma Bölgesine Etkileri	165
3.4.2.2. Kayaç Özelliklerinin Çakılma Bölgesine Etkileri	174
3.5. Yüzey Karakterizasyonu	178
3.5.1. Yüzey Pürüzlülüğü	178
3.5.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri	180
3.5.1.2. Kayaç Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri	185
3.5.2. Sapma Açısı	196
3.5.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Sapma Açısına Etkileri	197
3.5.2.2. Kayaç Özelliklerinin Sapma Açısına Etkileri.....	201
3.5.3. SEM Analizleri	210
3.6. Kesme Performans Ölçütleri Arasındaki İlişkiler ve Aşındırıcıların Garnete Göre Performans Karşılaştırması	220
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	224
5. KAYNAKLAR	227
6. EKLER	239
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

AŞINDIRICILI SU JETİ İLE DOĞAL TAŞ KESMEDE ALTERNATİF
AŞINDIRICILARIN PERFORMANSLARININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Serkan KAYA

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gökhan AYDIN
2022, 238 Sayfa, 9 Sayfa Ek

Bu çalışmada, aşındırıcılı su jeti (ASJ) ile doğal taşların kesilmesinde garnete alternatif olarak kullanılabilecek aşındırıcıların (beyaz ve kahve alüminyum oksit, cam küre, zımpara tozu, olivin, çelik bilye ve plastik granül) kesme performansları araştırılmıştır. Aşındırıcıların kesme performansları; kesme genişliği/derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı, kerf açısı, yüzey pürüzlülüğü ve sapma açısı temelinde değerlendirilmiştir. Doğal taşların/aşındırıcıların çeşitli özellikleri belirlenmiş ve bu özellikler aşındırıcıların kesme performansıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, regresyon analizleri ile kesme performans ölçütlerinin tahminine yönelik istatistiki modeller geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, çelik bilye ve alüminyum oksitlerin; kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve kerf açısı yönünden en iyi performansı gösterdiği tespit edilmiştir. Ek olarak, plastik granülün zayıf kesme performansı (sapma açısı hariç) gösterdiği saptanmıştır. Diğer taraftan, yüzey pürüzlülüğünün aşındırıcı özelliklerinden ziyade kayaç özellikleriyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Kesme performansını etkileyen en önemli malzeme özelliklerinin yoğunluk (aşındırıcı için) ve Böhme aşınma kaybı (doğal taşlar için) olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, geliştirilen modeller ile performans çıktılarının etkin bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak, kesim sonrasında arzu edilen özellikler temelinde (yüksek kesme derinliği, düşük yüzey pürüzlülüğü vb.) çalışmada irdelenen aşındırıcılardan (plastik granül haricindekilerin) garnete alternatifler olarak değerlendirilebileceği söylenebilir.

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 8522.

Anahtar Kelimeler: Aşındırıcılı Su Jeti, Aşındırıcılar, Doğal Taş, Kesme

PhD. Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF
ALTERNATIVE ABRASIVES IN NATURAL STONE CUTTING WITH ABRASIVE
WATERJET

Serkan KAYA

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mining Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Gökhan AYDIN
2022, 238 Pages, 9 Pages Appendix

In this study, the cutting performances of abrasives (garnet, white and brown fused alumina, glass beads, emery powder, olivine, steel shot and plastic granule) that can be used as alternatives to garnet in abrasive water jet (AWJ) cutting of natural stones were examined. Cutting performances of the abrasives were evaluated based on the cutting width/depth, material removal rate, kerf angle, surface roughness and declination angle. Various properties of the natural stones/abrasives were determined and correlated with the cutting performance of abrasives. Moreover, statistical models were developed for the estimation of cutting performance outputs with regression analysis. As a result of the study, it is revealed that the steel shot and aluminum oxides show the best performance in terms of the cutting depth, material removal rate and kerf angle. Additionally, it is also determined that the plastic granule shows poor cutting performance (excluding declination angle). On the other hand, it is concluded that the surface roughness is related to rock properties rather than abrasive properties. The most important material properties affecting the cutting performance were determined as density (for abrasive) and Böhme wear loss (for natural stones). Besides, it is concluded that the performance outputs can be predicted effectively with the proposed models. As a result, based on the desired parameters (high cutting depth, low surface roughness, etc.), it can be said that the abrasives (excluding plastic granule) examined in the study can be considered as alternatives to garnet.

This work was supported by Scientific Research Project Coordination Unit of Karadeniz Technical University. Project number: 8522.

Key Words: Abrasive Waterjet, Abrasives, Natural Stone, Cutting

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	ASJ sistemi şematik görünümü (Aydın vd., 2010)	14
Şekil 1.2.	Bir ASJ makinesi (URL-7).....	14
Şekil 1.3.	ASJ kesme kafası (Radovanovic, 2020).....	16
Şekil 1.4.	Kesme kafasının içinde aşındırıcılı su jetinin oluşumu (Çandar, 2012).....	17
Şekil 1.5.	Gevrek malzemede aşındırıcı tanenin yarattığı erozyon (Cha vd., 2019).	19
Şekil 1.6.	ASJ ile kesme işlemlerinde oluşan yüzey profili (Saravanan vd., 2020).	20
Şekil 1.7.	ASJ kesme kerf profili şematik gösterimi (Shanmugam ve Masood, 2009)... 21	
Şekil 1.8.	Çizik geometrisinin şematik gösterimi (Lebar ve Junkar, 2014).	23
Şekil 1.9.	ASJ ile kesimde oluşan kerf profili (Liu, 2004; Karakurt, 2011).....	25
Şekil 1.10.	Farklı çap/uzunlukta nozüller ve orifisler (URL-9).	26
Şekil 1.11.	ASJ nozülünün aşınma mekanizması ve etkili parametreler (Akkurt, 2002).. 30	
Şekil 1.12.	Kayaç içerisinde garnet minerali ve öğütülmüş garnet	34
Şekil 2.1.	Çalışma kapsamında kullanılan paketlenmiş aşındırıcılar	42
Şekil 2.2.	Piknometre deneyi.....	43
Şekil 2.3.	Aşındırıcıların SEM incelemeleri.....	44
Şekil 2.4.	Aşındırıcıların SEM görüntüleri (100 X)	46
Şekil 2.5.	Bloklar halinde temin edilen doğal taşlar.....	47
Şekil 2.6.	Schmidt çekici ile sertlik tayini	48
Şekil 2.7.	Küp numuneler ve Böhme aşınma deneyi.....	49
Şekil 2.8.	Karot alma işlemi ve karot kesme testeresiyle disk numune hazırlama.....	50
Şekil 2.9.	Kayaçlardan hazırlanan karot ve disk numuneler	50
Şekil 2.10.	Doğal taşların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi.....	51
Şekil 2.11.	Karot ve disk kayaç numuneleri kullanılarak yapılan deneyler	52
Şekil 2.12.	Dayanım deneyleri sonrası kırılmış numuneler	52
Şekil 2.13.	Dairesel testere ile kayaç blok kesimi	57
Şekil 2.14.	ASJ ile kesime tabi tutulacak numuneler	58
Şekil 2.15.	ASJ ile kesilecek doğal taş plaka numunelerin yüzey görünümleri.....	58
Şekil 2.16.	Çalışmada kullanılan ASJ deney düzeneği	59
Şekil 2.17.	ASJ kesme kafası ve kesilecek bir kayaç numunesi	61

Şekil 2.18.	Aşındırıcının hazneye beslenmesi	61
Şekil 2.19.	ASJ kontrol paneli	62
Şekil 2.20.	Kesilen bir numunenin yan ve üstten görünümü.....	62
Şekil 2.21.	Kesme genişliği, kerf açısı ve çakılma bölgesi verilerinin ölçümü.....	64
Şekil 2.22.	ASJ ile kesilmiş kayaç numunelerinin iç yüzeylerinin dairesel testere ile açılması	64
Şekil 2.23.	Kesme derinliklerinin ölçümü	65
Şekil 2.24.	Bir ölçümden elde edilen yüzey profili grafiği ve pürüzlülük değerleri örneği.....	66
Şekil 2.25.	Pürüzlülük cihazı ve kesim yüzeylerinde pürüzlülük ölçümü	66
Şekil 2.26.	Sapma açısı ve hesabı için ölçülen değerler	67
Şekil 2.27.	SEM analizi için ASJ kesim yüzeylerinden örnek hazırlanması.....	67
Şekil 3.1.	Aşındırıcı tipine göre kesme derinlikleri	74
Şekil 3.2.	Aşındırıcı sertliğine göre kesme derinlikleri	75
Şekil 3.3.	Aşındırıcı yoğunluğuna göre kesme derinlikleri	76
Şekil 3.4.	Kayaç tipine göre kesme derinlikleri	79
Şekil 3.5.	Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre kesme derinlikleri.....	80
Şekil 3.6.	Kayaçların porozitelerine göre kesme derinlikleri	81
Şekil 3.7.	Kayaçların doğal yoğunluklarına göre kesme derinlikleri	82
Şekil 3.8.	Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre kesme derinlikleri	83
Şekil 3.9.	Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre kesme derinlikleri	84
Şekil 3.10.	Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre kesme derinlikleri	85
Şekil 3.11.	Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre kesme derinlikleri	86
Şekil 3.12.	Aşındırıcı tipine göre kesme-aşınma derinlikleri	90
Şekil 3.13.	Kayaç tipine göre kesme-aşınma derinlikleri.....	92
Şekil 3.14.	Aşındırıcı tipine göre kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki ilişki	95
Şekil 3.15.	Kesme-aşınma derinliklerine bağlı olarak tahmin edilen kesme derinlikleri için rezidü grafikleri	98
Şekil 3.16.	Aşındırıcı tipine göre malzeme uzaklaştırma oranları	105
Şekil 3.17.	Aşındırıcı sertliğine göre malzeme uzaklaştırma oranları.....	106
Şekil 3.18.	Aşındırıcı yoğunluğuna göre malzeme uzaklaştırma oranları.....	107
Şekil 3.19.	Kayaç tipine göre malzeme uzaklaştırma oranları	109
Şekil 3.20.	Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre malzeme uzaklaştırma oranları	110

Şekil 3.21.	Kayaçların porozitelerine göre malzeme uzaklaştırma oranları.....	111
Şekil 3.22.	Kayaçların doğal yoğunluklarına göre malzeme uzaklaştırma oranları	112
Şekil 3.23.	Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre malzeme uzaklaştırma oranları.....	113
Şekil 3.24.	Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre malzeme uzaklaştırma oranları	114
Şekil 3.25.	Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre malzeme uzaklaştırma oranları	115
Şekil 3.26.	Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre malzeme uzaklaştırma oranları	116
Şekil 3.27.	Kesme genişliği en düşük ve en yüksek kesimler	121
Şekil 3.28.	Aşındırıcı tipine göre kesme genişlikleri.....	123
Şekil 3.29.	Aşındırıcı sertliğine göre kesme genişlikleri.....	124
Şekil 3.30.	Aşındırıcı yoğunluğuna göre kesme genişlikleri.....	125
Şekil 3.31.	Kayaç tipine göre kesme genişlikleri	127
Şekil 3.32.	Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre kesme genişlikleri.....	128
Şekil 3.33.	Kayaçların porozitelerine göre kesme genişlikleri.....	129
Şekil 3.34.	Kayaçların doğal yoğunluklarına göre kesme genişlikleri	130
Şekil 3.35.	Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre kesme genişlikleri	131
Şekil 3.36.	Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre kesme genişlikleri	132
Şekil 3.37.	Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre kesme genişlikleri	133
Şekil 3.38.	Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre kesme genişlikleri	134
Şekil 3.39.	En küçük (negatif), en büyük ve sıfır kerf açısı elde edilen kesimler	136
Şekil 3.40.	Aşındırıcı tipine göre giriş kerf açıları	138
Şekil 3.41.	Aşındırıcı tipine göre çıkış kerf açıları.....	139
Şekil 3.42.	Aşındırıcı sertliğine göre giriş kerf açıları	140
Şekil 3.43.	Aşındırıcı sertliğine göre çıkış kerf açıları	141
Şekil 3.44.	Aşındırıcı yoğunluğuna göre giriş kerf açıları	142
Şekil 3.45.	Aşındırıcı yoğunluğuna göre çıkış kerf açıları	143
Şekil 3.46.	Kayaç tipine göre giriş kerf açıları	146
Şekil 3.47.	Kayaç tipine göre çıkış kerf açıları.....	147
Şekil 3.48.	Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre giriş kerf açıları	148
Şekil 3.49.	Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre çıkış kerf açıları.....	149
Şekil 3.50.	Kayaçların porozitelerine göre giriş kerf açıları.....	150

Şekil 3.51. Kayaçların porozitelerine göre çıkış kerf açıları	151
Şekil 3.52. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre giriş kerf açıları.....	152
Şekil 3.53. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre çıkış kerf açıları	153
Şekil 3.54. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre giriş kerf açıları	154
Şekil 3.55. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre çıkış kerf açıları	155
Şekil 3.56. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre giriş kerf açıları	156
Şekil 3.57. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre çıkış kerf açıları	157
Şekil 3.58. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre giriş kerf açıları.....	158
Şekil 3.59. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre çıkış kerf açıları	159
Şekil 3.60. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre giriş kerf açıları.....	160
Şekil 3.61. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre çıkış kerf açıları	161
Şekil 3.62. Aşındırıcı tipine göre çakılma bölgesi derinlikleri.....	167
Şekil 3.63. Aşındırıcı sertliğine göre çakılma bölgesi derinlikleri	168
Şekil 3.64. Aşındırıcı yoğunluğuna göre çakılma bölgesi derinlikleri	169
Şekil 3.65. Aşındırıcı tipine göre çakılma bölgesi genişlikleri	171
Şekil 3.66. Aşındırıcı sertliğine göre çakılma bölgesi genişlikleri.....	172
Şekil 3.67. Aşındırıcı yoğunluğuna göre çakılma bölgesi genişlikleri.....	173
Şekil 3.68. Kayaç tipine göre çakılma bölgesi derinlikleri	175
Şekil 3.69. Kayaç tipine göre çakılma bölgesi genişlikleri	176
Şekil 3.70. Aşındırıcı tipine göre yüzey pürüzlülükleri.....	182
Şekil 3.71. Aşındırıcı sertliğine göre yüzey pürüzlülükleri.....	183
Şekil 3.72. Aşındırıcı yoğunluğuna göre yüzey pürüzlülükleri.....	184
Şekil 3.73. Kayaç tipine göre yüzey pürüzlülükleri	187
Şekil 3.74. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre yüzey pürüzlülükleri.....	188
Şekil 3.75. Kayaçların porozitelerine göre yüzey pürüzlülükleri.....	189
Şekil 3.76. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre yüzey pürüzlülükleri	190
Şekil 3.77. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre yüzey pürüzlülükleri	191
Şekil 3.78. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre yüzey pürüzlülükleri ..	192
Şekil 3.79. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre yüzey pürüzlülükleri	193
Şekil 3.80. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre yüzey pürüzlülükleri ...	194
Şekil 3.81. Aşındırıcı tipine göre sapma açıları.....	198
Şekil 3.82. Aşındırıcı sertliğine göre sapma açıları.....	199

Şekil 3.83. Aşındırıcı yoğunluğuna göre sapma açıları.....	200
Şekil 3.84. Kayaç tipine göre sapma açıları	202
Şekil 3.85. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre sapma açıları.....	203
Şekil 3.86. Kayaçların porozitelerine göre sapma açıları.....	204
Şekil 3.87. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre sapma açıları	205
Şekil 3.88. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre sapma açıları	206
Şekil 3.89. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre sapma açıları	207
Şekil 3.90. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre sapma açıları	208
Şekil 3.91. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre sapma açıları	209
Şekil 3.92. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde aşındırıcı tane çizdiği izleri (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet)	213
Şekil 3.93. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde sünek deformasyon (Kayaç: Rize tuf, Aşındırıcı: Garnet).....	213
Şekil 3.94. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde kırılma deformasyonu (Kayaç: Bazalt, Aşındırıcı: Garnet).....	214
Şekil 3.95. SEM görüntüsünde mikro sabanlama (ploughing) (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Garnet).....	214
Şekil 3.96. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinden kopan ve çakılan parçacıklar (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Cam)	215
Şekil 3.97. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinden kopan ve sürüklenen parçacıklar (Kayaç: Bazalt, Aşındırıcı: Garnet).....	215
Şekil 3.98. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinde süpürerek kesme (smeared) (Kayaç: Lamprofir, Aşındırıcı: Garnet)	216
Şekil 3.99. SEM görüntüsünde yüzeyden kopan kalsit tanesinin bıraktığı boşluk (Kayaç: Traverten, Aşındırıcı: Garnet)	216
Şekil 3.100. SEM görüntüsünde kesme yüzeyinde derin kesilme (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Olivin).....	217
Şekil 3.101. SEM görüntüsünde mineral tanesinde mikro çatlak (Kayaç: Bayburt tuf, Aşındırıcı: Garnet)	217
Şekil 3.102. SEM görüntüsünde kesim yüzeyine dağılmış aşındırıcı taneler (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet)	218
Şekil 3.103. SEM görüntüsünde kayaç boşluğunda sıkışmış aşındırıcı taneler (Kayaç: Rize tuf, Aşındırıcı: Garnet)	218
Şekil 3.104. Plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı örnek bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Plastik).....	219
Şekil 3.105. Pürüzlülüğü düşük bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü, R_a : 4,85 μm (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet).....	219
Şekil 3.106. Pürüzlülüğü yüksek bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü, R_a : 12,37 μm (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Cam)	220

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. İleri işleme/kesme teknolojilerinin sınıflandırılması (URL-5).	7
Tablo 1.2. ASJ kesme parametrelerinin etkileri ve dereceleri (Valicek vd., 2011).....	29
Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan aşındırıcıların tane boyut dağılımı	43
Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan aşındırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri	44
Tablo 2.3. Kullanılan aşındırıcıların kimyasal içerikleri (%).....	45
Tablo 2.4. Doğal taşların Schmidt sertlik değerleri.....	48
Tablo 2.5. Doğal taşların bazı fiziksel özellikleri.....	53
Tablo 2.6. Doğal taşların bazı mekanik ve diğer özellikleri.....	53
Tablo 2.7. Kayaçların kimyasal içeriği (%) (XRF analizi).....	54
Tablo 2.8. Kayaçların renk, doku ve tane büyüklükleri	54
Tablo 2.9. Kayaçların mineralojik bileşimleri.....	55
Tablo 2.10. Kayaçların mineralojik bileşimlerine yönelik açıklamalar	56
Tablo 2.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan ASJ makinesine ait özellikler.....	59
Tablo 2.12. ASJ için önerilen ve çalışmada kullanılan suyun değerleri (Tikhomirov vd., 1992; Ergür, 2007; Kaya, 2016; URL-11, 2022).....	59
Tablo 2.13. Kesme parametreleri ve değerleri	60
Tablo 2.14. Pearson korelasyon katsayısı skalası (Pearson, 1895).	68
Tablo 2.15. Model değerlendirme için tipik MAPE değerleri (Lewis, 1982).	69
Tablo 3.1. Kesme derinlikleri, h_t (mm).....	71
Tablo 3.2. Kesme derinlikleri standart sapmalar (mm)	71
Tablo 3.3. Kesme-aşınma bölgesi derinlikleri, h_a (mm).....	72
Tablo 3.4. Kesme-aşınma bölgesi derinlikleri standart sapmalar (mm).....	72
Tablo 3.5. Kesme derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	73
Tablo 3.6. Kesme derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	78
Tablo 3.7. Kesme-aşınma derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	89
Tablo 3.8. Kesme-aşınma derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	93
Tablo 3.9. Kesme-aşınma derinliği / kesme derinliği oranları	94

Tablo 3.10. Aşındırıcı tipine göre kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyon katsayıları.....	94
Tablo 3.11. Kesme derinliğinin, kesme-aşınma derinliği kullanılarak tahminine yönelik her aşındırıcı grubu için geliştirilen modeller ($Y=$)	96
Tablo 3.12. Regresyon modellerine ait determinasyon katsayıları (R^2).....	96
Tablo 3.13. Modellerin tahmin performans ölçütleri	97
Tablo 3.14. Kesme derinliğinin kayaç özelliklerine bağlı olarak tahmini için gerçekleştirilen tek değişkenli regresyon analizlerine ait sonuçlar.....	99
Tablo 3.15. Malzeme uzaklaştırma oranları, V_m (mm^3/sn)	103
Tablo 3.16. Malzeme uzaklaştırma oranı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	104
Tablo 3.17. Malzeme uzaklaştırma oranı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	108
Tablo 3.18. Malzeme uzaklaştırma oranının kayaç özelliklerine bağlı olarak tahmini için gerçekleştirilen tek değişkenli regresyon analizlerine ait sonuçlar.....	118
Tablo 3.19. Kesme genişlikleri, W (mm)	120
Tablo 3.20. Kesme genişlikleri standart sapmalar (mm).....	120
Tablo 3.21. Kesme genişliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	122
Tablo 3.22. Kesme genişliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	126
Tablo 3.23. Giriş kerf açıları, Θ ($^\circ$)	135
Tablo 3.24. Çıkış kerf açıları, Θ ($^\circ$).....	135
Tablo 3.25. Giriş kerf açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	137
Tablo 3.26. Çıkış kerf açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	137
Tablo 3.27. Giriş kerf açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	145
Tablo 3.28. Çıkış kerf açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	145
Tablo 3.29. Giriş çakılma bölgesi derinlikleri, h_c (mm)	163
Tablo 3.30. Çıkış çakılma bölgesi derinlikleri, h_c (mm).....	163
Tablo 3.31. Giriş çakılma bölgesi genişlikleri, W_c (mm).....	164
Tablo 3.32. Çıkış çakılma bölgesi genişlikleri, W_c (mm)	164
Tablo 3.33. Çakılma bölgesi derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	166
Tablo 3.34. Çakılma bölgesi genişliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	170

Tablo 3.35. Çakılma bölgesi derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	174
Tablo 3.36. Çakılma bölgesi genişliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	177
Tablo 3.37. Aritmetik ortalama sapma pürüzlülük değerleri, R_a (μm).....	178
Tablo 3.38. R_a değerleri standart sapmalar (μm).....	178
Tablo 3.39. Aritmetik ortalama sapmaların karekökü pürüzlülük değerleri, R_q (μm)	179
Tablo 3.40. R_q değerleri standart sapmalar (μm)	179
Tablo 3.41. Maksimum pürüzlülük derinliği değerleri, R_z (μm).....	179
Tablo 3.42. R_z değerleri standart sapmalar (μm).....	180
Tablo 3.43. R_a ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	181
Tablo 3.44. R_q ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	181
Tablo 3.45. R_z ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	181
Tablo 3.46. R_a ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	185
Tablo 3.47. R_q ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	186
Tablo 3.48. R_z ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları	186
Tablo 3.49. Sapma açısı değerleri, β ($^\circ$)	196
Tablo 3.50. Sapma açısı (β) değerleri standart sapmalar ($^\circ$)	196
Tablo 3.51. Sapma açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları .	197
Tablo 3.52. Sapma açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları.....	210
Tablo 3.53. Kesme performans ölçütlerinin birbirleri arasındaki korelasyon katsayıları .	221
Tablo 3.54. Aşındırıcıların kesme performans ölçütlerine göre sıralaması.....	222
Tablo 3.55. Aşındırıcıların garnete göre performansları	222

SEMBOLLER DİZİNİ

AOB	Beyaz alüminyum oksit
AOK	Kahverengi alüminyum oksit
ASJ	Aşındırıcılı Su Jeti
C	Kohezyon (MPa)
d_n	Nozül çapı (mm)
e	Boşluk oranı (%)
e_i	Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki farklar
E_k	ASJ'nin kinetik enerjisi (J)
h_a	Kesme-aşınma bölgesi derinliği (mm)
$h_ç$	Çakılma bölgesi derinliği (mm)
h_k	Kerf derinliği (mm)
h_t	Kesme derinliği (mm)
Is_{50}	Nokta yük dayanım indeksi (MPa)
m_a	Aşındırıcı besleme miktarı (g/sn)
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MAPE	Ortalama Mutlak Yüzde Hata (%)
m_w	Su debisi (g/sn, l/dk)
n	Toplam ölçüm sayısı
n_e	Efektif porozite (%)
p	Pompa basıncı (kPa, MPa, bar)
r	Korelasyon katsayısı
R^2	Determinasyon katsayısı
R_a	Aritmetik ortalama sapma pürüzlülük değeri (μm)
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata
R_q	Aritmetik ortalama sapmaların karekökü pürüzlülük değeri (μm)
R_z	Maksimum pürüzlülük derinliği (μm)
SEM	Taramalı elektron mikroskopu
S_r	Doyma derecesi (%)
V_w	Nozül çıkışındaki jetin hızı (m/sn)
V_m	Malzeme uzaklaştırma oranı (mm^3/sn)

V_p	Ultrasonik dalga hızı (m/sn)
V_t	Kesme hızı (mm/sn)
w	Doğal su içeriği (%)
w_e	Efektif su emme (%)
w_k	Ağırlıkça su emme kapasitesi (%)
W	Kesme genişliği (mm)
W_{alt}	Alt yarık genişliği (mm)
W_{φ}	Çakılma bölgesi genişliği (mm)
$W_{üst}$	Üst yarık genişliği (mm)
XRF	X ışını flüoresansı
y_i	Gerçek değerler
β	Sapma açısı (derece)
Θ	Kerf açısı (derece)
μ_g	Mineral tane yoğunluğu (g/cm ³)
μ_n	Tabii yoğunluk (g/cm ³)
ρ_w	Suyun yoğunluğu (g/cm ³)
σ_c	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)
σ_t	Çekme dayanımı (MPa)
Φ	İçsel sürtünme açısı (derece)
η	Verim katsayısı
ΔV	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Doğal taşlar, insanlık tarihinde maden olarak değerlendirilebilecek ilk malzemelerdir. Arkeolojik kazılar da doğal taş madenciliğinin tarih öncesi çağlarda yapıldığını kanıtlamaktadır. Taş Devri insanları kazıyıcı, bıçak ve ok ucu yapmak için çakmaktaşı kullanmışlardır. Eski Mısır'da ise insanlar büyük taş bloklarını kullanarak piramitler yapmışlardır. Antik Roma'da da doğal taşlar, yapı ve dekorasyon malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmıştır (Karahana, 2018). Doğal taş üretiminde-işlenmesinde kullanılan yöntemler antik çağlardan (ki devirlere adını vermiş; Yontma Taş, Cilalı Taş vb.) günümüze, teknolojik gelişmeler paralelinde değişime uğramış ve günümüzdeki halini almıştır. El işçiliği ve çeşitli araçlarla (diğer taşlar, ahşap malzemeler, kesici kamalar, bıçaklar, keskiler vb.) yapılan antik kayaç madenciliği; sonrasında kara barut, havalı delici gibi araçların keşfiyle ilerlemiş, modern çağlarda profesyonel makineler ve bileşenleriyle (dairese testereler, elmas teller, zincirli kesiciler vb.) verimli/sistematiğe hale gelmiştir. Özellikle son dönemlerde, doğal taş üretme-işleme süreçlerinde sunduğu avantajlardan ötürü (hassas kesme-işleme yapılabilmesi, düşük malzeme kaybı, kesici uç aşınması olmaması vs.) ileri kesme teknolojileri (lazer, alev jeti, su jeti vb.) sıklıkla tercih edilir bir hale gelmiştir. İlgili teknolojilere olan bu talebin gelecekte de artarak devam etmesi beklenmektedir. Aşındırıcı Su Jeti (ASJ), bu kapsamda değerlendirilebilecek ileri bir kesme-işleme yöntemidir.

ASJ, yüksek basınç ve hızla dar bir memeden (nozül) püskürtülen jetin (aşındırıcı taneler içeren su) aşındırma yoluyla numune yüzeyinden malzeme uzaklaştırması esasına dayanan bir kesme yöntemidir. 19. yüzyıl ortalarında maden üretiminde hidrolik madencilik yöntemiyle suyun aşındırıcı etkisinden yararlanmanın öncül uygulamaları görülmektedir. Ancak, yöntemin gelişimi bir sonraki asırda olmuş, su jeti 1930'larda kâğıt ve plastik sanayinde kullanılmaya başlanmıştır. Yine o yıllarda ilk kez su yerine su-aşındırıcı karışımı kullanılarak kesme uygulamaları gerçekleştirilmiş ve ASJ'nin temelleri atılmıştır. Sonraki yıllarda ise metal, kayaç gibi sert malzemelerin kesilmesini sağlayacak şekilde yöntem geliştirilmiştir. Özellikle son 50 yılda ASJ teknolojisini konu alan çalışmaların sayısındaki artış dikkat çekmektedir (Kaya, 2016).

ASJ teknolojisi endüstride işlenmesi zor malzemelerin kesilmesi/işlenmesi ve delinmesi, sert malzemelerin parlatılması, kirlenmiş yüzeylerin temizlenmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır (Pi, 2008). Madencilikte ise; hidrolik kazıda, boyut küçültmede, delik delme ve tünel açmada ve yaygın olarak doğal taşların kesilmesinde/işlenmesinde kullanılmaktadır (Karakurt, 2011). ASJ kesme yöntemi diğer kesme yöntemlerine nazaran yüksek ilk yatırım maliyetine sahiptir. Ancak karmaşık şekilli kesim yapabilmesi, işlem sırasında ısı ve toz oluşturmaması, çevre dostu olması gibi birçok avantajı, yöntemi ön plana çıkarmaktadır (Kartal, 2015).

Dünyada doğal taş rezervlerinin 15 milyar m³ olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervlerin %33'ü Türkiye'de bulunmaktadır (5,1 milyar m³- 13,9 milyar ton muhtemel rezerv). Ülkemiz doğal taş sektörü, dünya doğal taş piyasasında önemli bir yere sahiptir. Sektör; yüksek ihracat potansiyeli, iç piyasa tüketimi, doğal taş makineleri üretimi ve ihracatı ile Türkiye ekonomisine önemli bir katkı sağlamaktadır. Özellikle son dönemde klasik yöntemlerin değişmeye başlaması, nitelikli işgücü ve ileri teknolojiye dayanan modern üretim yöntemlerinin daha çok kullanılmaya başlanması, büyük firmaların yapmış oldukları yatırımlar ve bütünleşmiş üretim yapan tesislerin devreye girmesiyle işlenmiş doğal taş üretiminde büyük artış kaydedilmiştir. Türkiye, dünya doğal taş üretiminde lider on büyük üreticiden biri konumuna gelmiştir. Türkiye'de yıllık doğal taş üretimi 11,5 milyon ton civarında olup işleme tesislerinin toplam plaka üretim kapasitesi 6,5 milyon m² civarındadır (T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021).

Literatürde, ASJ'nin doğal taş kesiminde kullanımını irdeleyen çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, kesme parametrelerinin ve doğal taş özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkisi, kesme veriminin analizi, aşındırıcı boyutunun kesme performansına etkisi, aşındırıcıların tekrar kullanımı ve kesme performansının modellenmesi gibi konular ele alınmıştır. ASJ ile doğal taş kesmede kesme performansını/verimliliğini etkileyen faktörlerden birisi de aşındırıcı çeşididir. İhtiyaç duyulan gereksinimler doğrultusunda uygun aşındırıcıyı seçmek, önem arz etmektedir. ASJ uygulamalarında aşındırıcı olarak genellikle garnet kullanılmaktadır. Garnet dışındaki aşındırıcıların kesme performansını irdeleyen oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Oysa endüstride bu amaçla kullanılabilecek malzemeler bulunmaktadır. ASJ ile kayaç kesiminde farklı aşındırıcılarla gerçekleştirilen sınırlı sayıdaki çalışmada da kesilen kayaç çeşidinin sınırlı (tek ya da çok az) sayıda olması dikkat çekmektedir. Bu tez çalışmasında 8 farklı aşındırıcı türü (garnet, beyaz alüminyum oksit, kahverengi alüminyum oksit, olivin,

zımpara tozu, cam küre, çelik bilye ve plastik granül) kullanılarak, bu aşındırıcıların çeşitli doğal taşların (10 çeşit) ASJ ile kesilmesindeki performansları farklı performans göstergeleri temelinde (kesme derinliği, kesme-aşınma derinliği, kesme genişliği, çakılma bölgesi derinliği, çakılma bölgesi genişliği, kerf açıları, yüzey pürüzlülüğü ve sapma açıları) irdelenmiştir.

1.2. Doğal Taşlar ve Madenciliği

Doğal taş; içerisinde kum, çakıl, agregaları da akla getirebilecek geniş bir tanım olsa da bu çalışmanın konusu olan doğal taşlar, daha çok ticari anlamda mermer olarak isimlendirilen, 6727 sayılı Maden Kanunu'nda II. Grup b maddesinde yer alan; mermer, traverten, granit, andezit, bazalt gibi blok olarak üretilen taşlar ile dekoratif amaçla kullanılan doğal taşlardır. Doğal taşlar, jeolojik köken ve oluşumları açısından magmatik, sedimanter ve metamorfik kayaçlar olmak üzere üç temel gruba ayrılır. Başlıca magmatik kayaçlar; granit, bazalt, andezit; başlıca sedimanter kayaçlar kumtaşı, kireçtaşı, traverten ve başlıca metamorfik kayaçlar ise mermer, kuvarsit ve kayrak taşıdır (Adıgüzel ve Şengüler, 2019).

Önceki bölümde de bahsedildiği gibi doğal taşlar, antik çağlardan beri üretilmektedir. Doğal taş ocaklarının tarihi Yunanistan'da MÖ 3. yüzyıla, Türkiye'de (Anadolu) 7. yüzyıla ve İtalya'da 1. yüzyıla kadar uzanmaktadır. Doğal taşlardan yapılmış tarihi anıtlar, heykeller, tapınaklar, camiler bulunmaktadır. Ege Denizi'ndeki Paros ve Naxos adalarında doğal taş üretimi için ilk referans MÖ 3. yüzyıla tarihlenebilir. Antik dünyada bu adalar doğal taş üretimi konusunda popüler ve baskındı. Kalıntılardan, Anadolu'daki doğal taş tarihinin İlkçağa kadar uzandığı söylenebilir. Doğal taşın altın çağı olarak adlandırılacak, MÖ 7. yüzyıl ile MS 7. yüzyıl arasındaki dönemde, Anadolu'da çok çeşitli doğal taşlar işlenmiş ve kullanılmıştır. Günümüzde doğal taş ocaklarında son teknoloji araçlar kullanılmaktadır. Bu da daha az işçilikle daha fazla doğal taşın üretimine olanak sağlamaktadır (URL-1, 2022).

1.3. Doğal Taş Kesme Yöntemleri

Doğal taş ürünleri blok üretimi (madencilik süreci) ve boyut küçültme/yüzey işleme süreçleri (tesis süreci) sonunda elde edilmektedir. Madencilik sürecinde, doğal taş

yatağından bloklar halinde üretim gerçekleştirilmekte ve bloklar taşınabilir bir forma getirilerek tesise nakledilmektedir. Tesis sürecinde ise, ocaktan gelen doğal taş ürünü boyutlandırma, cilalama vb. işlemlere tabi tutulmaktadır. Her iki süreçte de beceri ve koordinasyon eşliğinde son teknoloji ürünler kullanılarak faaliyetler yürütülmelidir. Düzgün yüzeyli ve boyutlandırılmış son ürünlerin elde edilmesi için ocak ve tesisteki üretim süreçlerinde kesme işlemleri uygulanmaktadır. Kesme teknolojilerini temel olarak geleneksel, modern ve ileri kesme teknolojileri olarak sınıflandırmak mümkündür.

1.3.1. Geleneksel ve Modern Doğal Taş Kesme Yöntemleri

Dünyada taş kesmenin tarihi, insanın balta gibi basit aletlerle taş kesebildiği MÖ 3000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Doğal taş kesmenin en ilkel yöntemi, sertlik farkından yararlanılarak taşların birbirini aşındırması yöntemiydi. Yöntemin uygulanması Erken Taş Devri'ne kadar uzanan bir dönemi kapsamaktadır. Bu dönemde doğal taşlar başlıca savunma-avlanma aracı olarak kullanılmıştır. Antik kesici aletler, çekiç taşlarını ve kesici kenarlar sağlamak için daha küçük pulların dövüldüğü çekirdek taşlarını içermekteydi. Eski Mısır uygarlıkları tarafından inşa edilen piramitler ve dikilitaşlar tarihte bulunan çarpıcı doğal taş işçiliği örneklerinden bazılarıdır. Mısırlılar döneminde, üretimi planlanan blokların etrafı kazılmış ve alt kesme işlemi uygulanarak bloklar ana kütleden ayrıştırılmıştır. Blok üretiminden sonra ise çekiç ve keskiler kullanılarak blok üzerinde bir dizi delik açılmıştır. Suyu batırılmış tahta takozlar ilgili deliklere yerleştirilmiş ve zamanla takozların genişmesi sonucu blok belirli bir düzlem boyunca parçalara ayrılmıştır. Bu bileşenleri takiben doğal taşların kesilmesinde/işlenmesinde bronz aletler de kullanılmıştır. Bu aletler, genellikle kalker ve sertliği düşük doğal taşların işlenmesinde kullanılmıştır. Uzun zamandan beri odun kesmek için kullanılan testerelerin doğal taşların kesilmesinde kullanılması ise kaçınılmaz olmuştur. Ancak, mevcut en sert malzemelerden yapılmış testereler dahi düşük sertlikteki doğal taşlar dışında fazla kullanılmamaktaydı (URL-2, 2022). 19. yüzyılda helezon telin geliştirilmesiyle doğal taş kesme süreçlerinde büyük bir aşama kaydedilmiştir. Helezon tel ile kesme işlemi, 5-6 m/sn ile hareket edebilen bir ana kasnak tarafından döndürülen ve yardımcı kasnaklar vasıtasıyla yönlendirilen çelik telin (3 kat ters sarımlı, salyangoz kabuğu görünümlü ve yüksek karbonlu) doğal taşı aşındırmasıyla gerçekleştirilmektedir. Aşındırıcılığın artırılması amacıyla kesim yüzeylerine zımpara tozu, silis kumu, kuvarsit veya çakmak taşı ile su beslenmektedir (Eleren ve Ersoy, 2007). Diğer bir geleneksel yöntem

ise patlayıcıların kullanılarak üretimin gerçekleştirildiği yöntemdir. Bu yöntemde doğal taş üzerinde açılan sıralı delikler barut gibi zayıf patlayıcılarla şarj edilir ve doğal taşın ana kütlede ayrılmaması sağlanır. Diskli kesicilerle üretim yönteminde ise, bir ray üzerinde hareket eden makineye montelenmiş kesici bir disk aracılığıyla kesme işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde, yeterli büyüklükte disklerin kullanılamamasından ötürü (kesme derinliğinin disk yarıçapı ile sınırlı olması) istenilen kesme derinliklerine ulaşılamamıştır. Bronz ve Demir Çağlarında ise bu işlemler, çekiç ve bronz aletler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (URL-3, 2022).

Yukarıda bahsedilen yöntemlerle birlikte bunların dışında kamalama, delik delme, darbe ile ayırma gibi diğer eski yöntemlerin günümüzde hemen hemen tamamen uygulanması terk edilmiştir. Günümüzde en yaygın kullanılan doğal taş kesme yöntemleri elmas telli kesme ve kollu kesicilerle kesme yöntemleridir. Elmas tel ile kesmede elmas boncuklar monte edilmiş çelik tel doğal taşla sürterek aşındırma yoluyla kesme işlemini gerçekleştirmektedir. Bu tel, bir ray üzerinde ilerleyen makinenin gövdesine sabitlenmiş kasnağa sarılıdır. Bu kasnak dönerek teli hareket ettirir. Soğutma ve kayaç parçacıklarının uzaklaştırılması amacıyla kesme ortamına su beslenir (Özçelik vd., 2004). Elmas teller blok kesiminin yanında, düzensiz blokların şekillendirilmesinde ve ana blokların taşınabilir bir forma dönüştürülmesinde de kullanılmaktadır. Kollu kesme makinesi ise raylar üzerinde hareket eden bir güç ünitesi ve buna bağlı kesici koldan ibarettir. Kesici kol yatayda 180° ve düşeyde 360° konumlandırılabilir (Eleren ve Ersoy, 2011).

Buraya kadar bahsedilen kesme yöntemleri daha çok doğal taş ocaklarında büyük boyutlu blokların elde edilmesi için uygulanmaktadır. Büyük blokların doğal taş fabrikalarında kesilerek fayans, plaka gibi nihai ürün haline getirilmesi için de çeşitli ekipmanlar kullanılmaktadır. Ocaktan fabrikaya getirilen bloklardan birden fazla levhanın üretimini eş zamanlı olarak gerçekleştirebilen katarlar, bunlardan birisidir. Katarlar bir gövde üzerine monte edilmiş elektrik motoru, bu motorun döndürdüğü bir volan, volanın göbeğine bağlanan mafsallık, mafsala bağlı bir kasa, bu kasa üzerine monte edilmiş lamalar, vagon, elektrik-elektronik sistem ve kontrol kumanda merkezinden oluşmaktadır. Katar makineleri, lamaların yan yana bağlanıp ileri geri hareketiyle kesme işlemi yaparlar. Katar lamalarında asıl kesme işlemini lamaların uç kısımlarında belirli aralıklarda kaynatılmış elmas soketler yapmaktadır (Ersöz, 2014).

Doğal taş fabrikalarında en yaygın kullanılan kesme aracı elmas soketli dairesel testerelelerdir. Boyutlandırma işlemlerinde çeşitli çaplardaki elmas soketli dairesel testereleler

amaç doğrultusunda dikey-yatay olarak ve tek-çok sayıda farklı makinelere monte edilirler. Elmas soketli dairesel testereler S/T, köprü kesme, baş kesme ve yatay yarma makinesi gibi cihazlarda kullanılırlar. Baş ve yan kesme makineleri sırasıyla levhaların baş kısımlarının düzleştirilmesinde ve levha genişliklerinin belirlenmesinde kullanılırlar. Kesici diskler 200-3500 mm arasında değişen çaplarda üretilmekte ve 1000-5000 dev/dk hızlarda kesim gerçekleştirebilmektedirler. Bu diskler gövde ve soketler olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadırlar. Disk etrafına lehimle sabitlenen soketler kompozit olarak üretilmekte ve kesim bu soketler aracılığıyla yapılmaktadır. Gövde ise, soketlerin kesim gerçekleştirebilmesi için onlara hareket imkânı sağlayan özel alaşımlı malzemeden üretilmektedir. Kesici disklerde, çaplarına uygun kapasitedeki motorlardan güç alan kayış-kasnak mekanizması, hareketi diskin bağlı olduğu mile aktarmakta ve diskin dönmesini sağlamaktadır (Aydın, 2012).

Bunlar dışında doğal taşların yüzeylerinde işlem yapmak için bazı cihazlar da kullanılmaktadır. Bunlardan, cilalama ve silim makineleri doğal taş yüzeyinin parlak ve pürüzsüz görünmesini sağlama amacıyla kullanılır. Kumlama, çekiçleme vb. makineler ise doğal taş yüzeyine pürüzlü bir yapı kazandırmak ve kaymayı azaltmak/engellemek amacıyla tercih edilmektedir (Kulaksız, 2012).

1.3.2. İleri Kesme Teknolojileri

Gelişen bilim ve teknolojiyle birlikte birçok sektörde olduğu gibi madencilikte de ileri teknikler kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel olmayan ya da alışılmamış kesme yöntemleri olarak da adlandırılan ileri kesme yöntemleri genellikle kesim için kullanılan enerjiye (mekanik, kimyasal, ısı vs.) göre sınıflandırılır (Tablo 1.1). Bu yöntemlerde kesilecek malzeme ile kesme takımı arasında doğrudan bir temas yoktur. Geleneksel yöntemlere göre, düz/karmaşık şekilli kesimleri yüksek doğruluk ve kalitede gerçekleştirebilirler. Ekipman ömürleri uzundur ve yüksek malzeme uzaklaştırma oranıyla beraber hızlı kesim avantajı sunarlar. Buna karşın, yüksek yatırım maliyeti ve tecrübeli operatör ihtiyacı gibi dezavantajları bulunmaktadır (URL-4, 2022).

Tablo 1.1. İleri işleme/kesme teknolojilerinin sınıflandırılması (URL-5).

İşleme metodu		Ana enerji formu	İşlev
Elektro erozyon ile işleme		Elektrik, termal	Ergitme, gazlaştırma
Elektrokimyasal işleme		Elektrokimyasal	İyon transferi
Yüksek enerji demeti ile işleme	Lazer demeti	Işın, termal	Ergitme, gazlaştırma
	Elektron demeti	Elektrik, termal	Ergitme, gazlaştırma
	İyon demeti	Elektrik, mekanik	Kesme
	Plazma ark	Elektrik, termal	Ergitme, gazlaştırma
Kesme ve erozyon ile işleme	Ultrasonik	Akustik, mekanik	Kesme
	Aşındırıcılı akışkan	Mekanik	Kesme
Kimyasal işleme	Kimyasal frezeleme	Kimyasal	Korozyon
	Fotografik plaka	Kimyasal, ışık	Korozyon
	Taşbaskı	Kimyasal, ışık	Fotokimyasal, korozyon
	Foto-elektriksel şekillendirme	Kimyasal, ışık	Fotokimyasal, korozyon
	Asitle eritme	Kimyasal	Korozyon
	Bağlama	Kimyasal	Kimyasal bağ
	Patlatma	Kimyasal, mekanik	Patlama
Şekillendirme	Toz metalürjisi	Termal, mekanik	Isıl biçimleme
	Süper plastik	Mekanik	Süper plastik
	Hızlı prototip üretme	Termal, mekanik	Sıcak ergitme
Birleşik işleme	Elektrokimyasal ark	Elektrokimyasal	Ergitme, gazlaştırma, korozyon
	Elektro erozyon mekanik öğütme	Elektrik, termal	İyon transferi, ergitme, kesme
	Elektrokimyasal eritme	Elektrokimyasal, termal	Ergitme, gazlaştırma, korozyon
	Ultrasonik elektro erozyon mekanik	Ses, ısı, elektrik	Ergitme, kesme
	Karmaşık elektrolitik işleme	Elektrokimyasal, mekanik	Kesme
	Kesme tabanlı kombine işleme	Mekanik, akustik, manyetik	Kesme

İleri kesme teknolojilerinin sahip olduğu özellikler aşağıdaki gibi özetlenebilir (URL-5, 2022):

- Ekipmanların sertliği, kesilecek malzemeden önemli ölçüde daha düşük olabilir.
- Malzemeler; elektrik, elektrokimyasal, ses veya ışık enerjisi kullanılarak doğrudan işlenebilir.
- İşleme sırasında mekanik kuvvetler belirgin değildir ve kesilen malzeme nadiren mekanik ve termal deformasyon üretir. Bu durum kesme performansının iyileştirilmesine yardımcı olur.
- Farklı yöntemlerle veya birbirleriyle birleştirilerek kombine şekilde kullanılabilirler.

Geleneksel olmayan işleme/kesme yöntemleri genellikle metalik malzemeler üzerinde uygulanmaktadır. Son yıllarda, metal kesme teknolojilerinin bazıları, doğal taş kesme işlemlerinde de verimli bir şekilde uygulanmaktadır. Takip eden bölümlerde yaygın olarak kullanılan bazı ileri kesme teknolojileri hakkında bilgiler sunulmaktadır.

1.3.2.1. Lazer ile Kesme

Lazer, elektrik enerjisini bir tür ışığa dönüştüren optik bir dönüştürücüdür. Lazer demeti ile kesme, buharlaştırma ve eritme yoluyla malzemeyi uzaklaştırmak için bir lazer ışınının ışık enerjisinin kullanılmasıdır. Bu süreçte, aynı fazlı ışık demeti, belirli bir süre için optik olarak odaklanır. Işın darbelidir; böylece serbest bırakılan enerji, erime ve buharlaşma yapan çalışılan numune yüzeyine karşı bir darbe oluşturur. Lazer demeti makinesi; bir lazer tüpü, tüpün her iki ucunda birer tane olmak üzere bir çift reflektör, bir flaş tüpü veya lambası, bir yoğunlaştırıcı, bir güç kaynağı ünitesi ve bir soğutma sisteminden oluşur. Tüm bu kurulum, içinde kaliteli yansıtıcı yüzey taşıyan bir muhafaza içine yerleştirilmiştir. Klasik yöntemlerle işlenemeyen malzemelerin işlenmesi, herhangi bir aşınan uç-equipman olmaması, kesim hattında az malzeme kaybı ve hasar (sadece işlem gören küçük bir noktaya lazer demeti odaklandığı için işlenen malzemenin geri kalan kısımlarının ısıdan etkilenmemesi), hassas kesim imkânı yöntemin başlıca avantajlarından. Bunun yanında yöntem yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetine sahip olması, üretim hızı ve verimin düşüklüğü, sadece ince numuneler için kullanılabilmesi, yetenekli bir operatör gerektirmesi ve yüksek ışık yansıtan malzemeler için kullanılamaması gibi dezavantajlara sahiptir (URL-4, 2022).

1.3.2.2. Plazma Ark

Plazma arkının ısı enerjisiyle malzemelerin kesilmesi/işlenmesi bir diğer ileri kesme teknolojisidir. Plazma arkı yüksek enerji yoğunluğuna, ark kolonunda yüksek sıcaklığa ve yüksek delme kabiliyetine sahiptir. Kaynak ve şekillendirme yapabilir. Yüksek hızlı, verimli ve kesim bölgesinde düşük deformasyon meydana getiren bir yöntemdir. Bunun yanında karmaşık yapıli donanımı, yüksek gaz tüketimi ve yalnızca kapalı alanda kullanılabilmesi gibi dezavantajları vardır (URL-5, 2022).

1.3.2.3. Elektron Demeti

Yüksek enerjili yakınsak elektron demetinin termal ya da iyonlaşma etkisini kullanarak malzemelerin işlenmesi esasına dayalı bir ileri teknolojidir. Tungsten veya tantalden yapılmış bir katot kullanılır. Katot, yaklaşık 2500 °C sıcaklığa ısıtılır, bu da elektronların termo-iyonik emisyonuna yol açar. Katottan sonra bir ızgara yer alır. Katot tarafından üretilen elektronların ayrılmaması ve bir sonraki elemana yaklaşmaması için bu ızgaraya yüksek bir negatif ön gerilim uygulanır. Işın şeklindeki anot elektron ışınını çeker ve giderek hızlanır. Elektron demeti ile işleme yöntemi, mekanik özelliklerinden bağımsız olarak hemen hemen her malzemeyi işleyebilmesi ve ısıdan etkilenen bölgelerin az olması gibi avantajlara sahiptir. Bunun yanında, ekipman maliyetinin yüksek olması, yetenekli operatör gerektirmesi, kalın numunelerin kesme ve işlenmesine uygun olmaması yöntemin başlıca dezavantajlarıdır (URL-4).

1.3.2.4. İyon Demeti

İyon demeti ile işleme, bir iyon kaynağı tarafından üretilen iyon akışının hızlandırılması ve vakum durumunda numunenin yüzeyine odaklanmasıyla gerçekleştirilir. İyonik akış yoğunluğu ve iyonik enerjinin hassas kontrolü sayesinde nanometre ölçeğinde, moleküler ve atomik seviyede işlem yapmak mümkündür. İyon demeti makinesi çok düşük yüzey deformasyonu meydana getirir. Ancak, işletme maliyeti yüksektir (URL-5, 2022).

1.3.2.5. Ultrasonik Yöntem

Ultrasonik işlemede, mekanik titreşime dönüştürülen mıkmatısal etkiler vasıtasıyla ultrasonik dalgalar üretilir. Bu yöntemde malzeme, bir süspansiyon içerisindeki ince aşındırıcı taneler ile erozyon yoluyla numuneden uzaklaştırılır. Bir aşındırıcı tüpten aşındırıcı taneler verilmektedir. Cihaz ile numune ara yüzeyi arasındaki su, basınç altında aşındırıcılı süspansiyonu sağlamak için kullanılır. Yöntem, çok sert ve kırılğan malzemelerin işlenebilmesi, çok düzgün ve yüzeyi kaliteli kesimler yapılabilmesi, düşük işletme maliyetine sahip olması ve çevre dostu olması gibi avantajlara sahiptir. Yüksek ilk yatırım maliyetine sahip olması, malzeme uzaklaştırma oranının düşük olması, yumuşak ve sünek malzemeler için uygun olmaması ve süspansiyonun sık sık değiştirilmeye ihtiyaç duyması gibi dezavantajları vardır (URL-4, 2022).

1.3.2.6. Aşındırıcılı Jet

Aşındırıcılı jet sistemlerinde aşındırıcı taneler içeren kuru hava, nitrojen, karbon dioksit veya su gibi bir akışkan-aşındırıcı karışımı jet, yüksek basınçta ve yüksek hızla kontrollü koşullar altında numune yüzeyine çarptırılır. Çalışma yüzeyine darbeye çarpan jet yüzeyden aşındırma yoluyla malzeme uzaklaştırmakta ve kesme işlemi gerçekleşmektedir. Aşındırıcılı su jeti (ASJ), bu çalışmanın ana konusu olduğundan, sonraki bölümlerde detaylı olarak tanıtılacaktır.

1.4. ASJ Teknolojisi

Yüksek basınç altında dar çaplı bir delikten boşaltılan suyun akış hızı 800 m/s'ye kadar çıkabilir. Böyle bir su akışının kaya, plastik, ahşap ve hatta bazı metal malzemelere çarpması sonucu malzeme yüzeyinde kesilme, çatlama ve ayrışma meydana gelebilir. ASJ, yüksek hızdaki su akışına aşındırıcı tanelerin eklenmesiyle oluşturulur. Böylelikle suyun kesme kabiliyeti önemli ölçüde iyileştirilebilir. ASJ; havacılık, savunma, otomotiv ve imalat gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Wang vd., 2021).

Bir ASJ sistemi potansiyel enerjinin hazırlanması ve potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüştürülmesi olarak iki fiziksel prensibe dayalıdır. Su, bir basınç yükseltici sistem

aracılığıyla yüksek bir basınca kadar sıkıştırılır ve yüksek hızlarla özel olarak üretilmiş nozülünden geçirilir. Meydana getirilen jet ile, numune yüzeyinde hassas bir kesim gerçekleştirir. İnce ve dairesel kesitli su jeti içine odaklanan kuvvet, 90 km/s bir hızla hareket eden otomobilin enerjisine eşdeğer bir enerjiyi ortaya çıkarır. Basınçlı jetin gönderildiği noktada oluşan enerji dönüşümü, temas noktasında numunenin kırılmasına neden olur. Söz konusu kırılma ve aşınma birkaç mekanizmanın bir araya gelmesiyle gerçekleşir (Akkurt, 2004).

ASJ, hemen hemen her malzemeyi kesebildiğinden, endüstride geniş bir alanda kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay, kâğıt, otomotiv, tekstil, gıda, paketleme, plastik, metal, cam/seramik, tıp ve madencilik endüstrisi bu alanlara örnek verilebilir. ASJ belirtilen alanlarda, temizleme, tornalama, delik delme, sanatsal işleme (yazı/şekil) ve kesme gibi birçok farklı amaçla kullanılabilir (Akkurt, 2004; Engin, 2006; Karakurt, 2011; Karakurt vd., 2010b; Kartal, 2015).

ASJ'nin, diğer ileri kesme teknolojilerine göre olumlu ve olumsuz yanları şunlardır:

- İnce numuneler üzerinde gerçekleştirilen ASJ kesimlerinde, elde edilen yüzeylerin kalitesi lazerle kesme yöntemine yakın ve diğer tüm kesme yöntemlerinden üstündür. Ancak kalın numuneler için erozyon tezgâhı ile kesme metodu (üzerinden elektrik akımı geçirilen bir tel ile iletken malzemelerin kesilmesi) ile ASJ kesme metodundakinden daha hassas bir yüzey elde edilmektedir.
- Lazer ile kesilemeyen, farklı yanma veya erime sıcaklığına sahip çeşitli numuneler ASJ ile kesilebilir.
- ASJ'nin kesme kalınlığı plazma (en fazla 5 cm) ve lazerin kesme kalınlığından (2 cm'ye kadar) daha fazladır.
- ASJ'nin montajı ve kurulumu lazere göre daha kolay ve ucuzdur.
- Plazma kesim yönteminde olduğu gibi kesilen yüzeylerde aşırı cüruf oluşmasına sebep olmadığı için ikincil bir yüzey işleme gerek duyulmaz (özellikle düşük derinlikli kesimler için). Bu da maliyet açısından avantaj sağlar.
- ASJ, kayaç gibi iletken olmayan malzemelerde ısı ile kesim yöntemlerinden daha yavaştır ancak metal gibi iletken malzemelerde benzer hızdadır.
- ASJ ile kesimde, diğer ileri kesme teknolojilerine göre daha fazla gürültü meydana gelir.
- ASJ'nin birim kesme maliyeti, lazer ve plazma ile kesme işlemlerinden daha yüksektir. ASJ'nin genel anlamda avantajları ise şunlardır:

- Soğuk bir kesme işlemidir. Kesilen numunenin yüzeyinde ve yapısında yanma, erime, şekil değiştirme gibi termik problemler oluşmaz.
- Tek bir makine ile birçok farklı malzemenin kesimine imkân sağlar.
- Kesme işlemine numunenin herhangi bir noktasından başlanabilir. Karmaşık ve zor kesimler yapılabilir.
- Gıda sektöründe hijyenik kesim standartları sağlar.
- Zararlı gaz ve toz oluşturmadiğundan sağlık ve çevre açısından avantajlıdır.
- Jet bileşeni olarak kullanılan su; kolay temin edilebilir, ucuz ve boldur.
- Kolaylıkla otomatikleştirilebilir ve diğer kesme yöntemleriyle kombine çalışacak şekilde uyarlanabilir.
- Malzeme kaybının az olmasından ötürü yüksek verimler elde edilebilir.
- Kurma-sökme işlemleri kolaydır.
- Kesici uç olmadığı için bileme gibi problemler yoktur.
- Kesme kuvveti düşüktür. Böylelikle spesifik enerji de düşeceğinden ekonomik avantaj sağlar.
- Kesim sonrası aşındırıcı taneler, geri dönüştürülüp belli bir oranda ve döngüde tekrar kullanılabilir.
- Kesilen malzemenin kusurları (boşluk, çatlak gibi) diğer kesme yöntemlerinde (testere, elmas tel vs.) problemler meydana getirmektedir (uç sıkışması, sapma vs.). ASJ yönteminde ise belirtilen kusurlar kesme ile ilgili herhangi bir probleme yol açmamaktadır. Aksine bu kusurlar kesme performansının iyileşmesine katkı sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte ASJ, bazı dezavantajlara sahiptir:

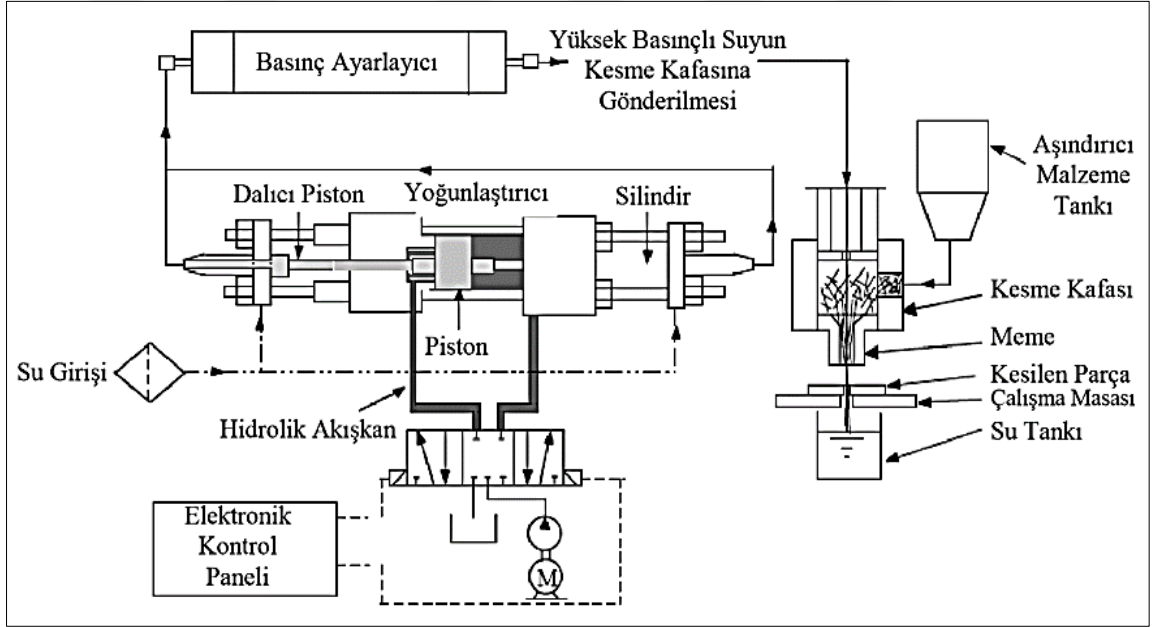
- İlk yatırım ve bakım maliyeti yüksektir.
- Çelik ve diğer sert malzemelerin kesimi yapılırken kesme hızı düşüktür.
- Konik bir kerf olduğu için, özellikle kalın malzemelerin kesimi problemlidir (Ramulu, 1997; Momber ve Kovacevic, 1998; Wang, 2007; Dahil, 2008; Pi, 2008; İnal, 2011; Karakurt, 2011; Kulaksız, 2012; Çandar, 2012; Saraçyakupoğlu, 2012; Kartal, 2015; Kaya, 2016).

1.4.1. Su Jeti Tarihçesi

Su jeti sistemleri günümüzde kullandığımız şekline gelene kadar zaman içerisinde değişime uğramıştır. Su jeti ilk olarak 1850'lerde Yeni Zelanda ve Rusya'daki kömür madenlerinde kazı için kullanılmıştır. Bu hidrolik madencilik tekniği daha sonra Kaliforniya'daki kömür madencileri tarafından uyarlanmıştır ve 800 PSI (yaklaşık 55 bar) basınçlı su elde edilmiştir. Yıllar içinde, gelişen teknoloji paralelinde jet basıncı arttırılmış ve farklı türdeki malzemelerin kesilebilmesi sağlanmıştır. 20. yüzyılın başlarında, su basıncı ikiye katlanarak 1600 PSI düzeyine (yaklaşık 110 bar) ulaşılmıştır. Madencilik dışında endüstriyel bir ortamda su jeti ile kesme ilk kez 1930'larda kullanılmaya başlanmıştır. 1933 yılında bir kâğıt şirketi, diyagonal olarak hareket eden bir su jeti huzmesini yatay hareket eden kâğıtları kesmede kullanmıştır (Fourness ve Pearson, 1935). Leslie Tirrell ve Elmo Smith, su jetini kâğıt kesme amacıyla kullanmışlardır. 1935'te Smith, su jetinin daha sert malzemeleri kesmesini sağlamak için su akışına aşındırıcı taneler ekleme fikrini ortaya atmıştır. Aşındırıcı ve suyun karışımı püskürtülerek aşındırma ortamı sağladığı ilk nozül, 1937'de üretilmiştir (Tirrell, 1939). 1950'lerde Norman Franz adlı bir mühendis, kereste kesmek için yüksek basınçlı su sistemlerine aşındırıcı taneler ekleyerek kesme denemeleri gerçekleştirmiştir. Bulguları, aşındırıcılı su jetlerinin daha önce kullanılan daha sert malzemeleri kesmede etkili olduğunu kanıtlamıştır. 1950'lerin sonlarında mühendisler, paslanmaz çelik gibi yüksek mukavemetli alaşımları kesme yeteneğine sahip su jetini geliştirmişlerdir (Schwacha, 1961). Bu yöntem etkili olmasa da yüksek dayanıma sahip malzemelerin kesilmesinde dahi su jetinin kullanılması fikrinin yaygınlaşmasına imkân sağlamıştır. 1970'lerde, kristal su jeti orifisinin icadıyla su jeti ile kesme yöntemi ticarileşmeye başlamıştır. Bendix Corporation tarafından üretilen kristal orifisler, su jetlerinde ana jet akımının elde edilmesinde yardımcı olmuştur. Su jetinin bu versiyonu 60000 PSI (yaklaşık 4137 bar) su basıncına ulaşabilmiştir (Chadwick vd., 1973). 1971 yılında korund orifisli, 0,002 inç (0,051 mm) çaplı su jeti nozülü geliştirilmiştir (Franz, 1971). Su jeti tarihindeki en önemli atılımlardan biri, 1980'lerde Mohamed Hashish'in ticari kullanıma uygun bir nozül geliştirmesidir (Hashish vd., 1987). Son 40 yılda su jeti ile kesme sistemi sürekli olarak geliştirilmiş ve olabildiğince hassas, uygun maliyetli ve küçük boyutlu hale getirilmiştir. Günümüzde, yeni ve daha da uygun maliyetli modeller ortaya çıkmaya devam etmektedir. Gelecekte su jetlerinin daha da büyük ölçekte kullanılabileceği öngörülmektedir (Kaya, 2016; URL-6, 2022).

1.4.2. ASJ Bileşenleri ve Çalışma Mekanizması

Standart bir ASJ sistemi genellikle elektronik kontrol paneli, pompa sistemi, hidrolik ünite, basınç ayarlayıcı, akümülatör, esnek yüksek basınç iletim boruları, açma-kapama valfi, aşındırıcı besleme ünitesi ve kesme kafasından oluşmaktadır. Şekil 1.1’de ASJ sistemi şematik olarak verilmektedir. Şekil 1.2’de ise bir ASJ makinesine ait bir görüntü sunulmaktadır. ASJ makinesi; ASJ sistemine ek olarak körüğe (kesme kafasını tutar ve çoğu modelde üç yönde/açılı hareket edebilir), tablaya (kesilecek numunelerin üzerine yerleştirildiği ızgaralar içerir) ve tanka (kesim sonrasında aşındırıcı, su ve malzeme kırıntılarını depolayan) sahiptir.



Şekil 1.1. ASJ sistemi şematik görünümü (Aydın vd., 2010)

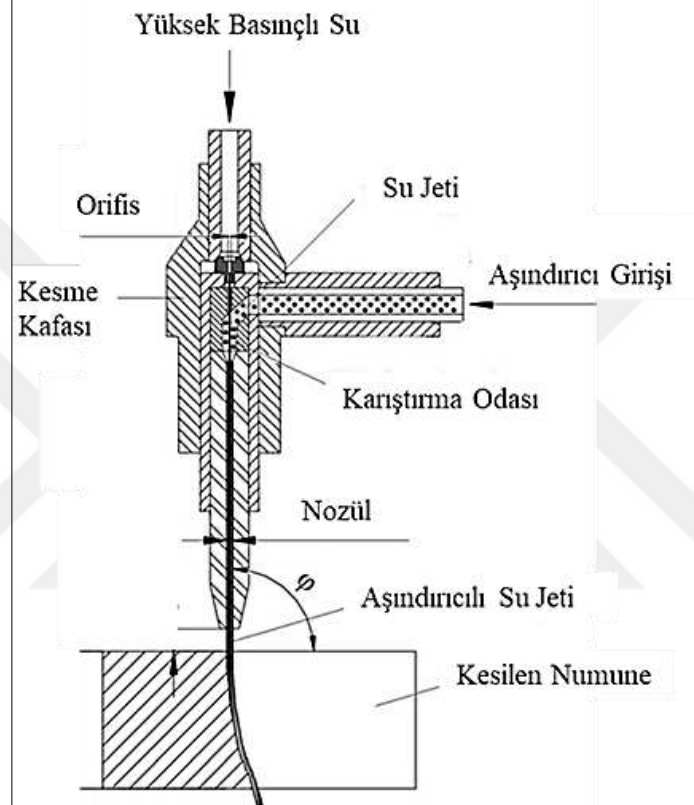


Şekil 1.2. Bir ASJ makinesi (URL-7).

Yoğunlaştırıcı (suyu küçük bir delikten zorlayarak bir pistonu hareket ettirmek için hidrolik yağı kullanarak basınç oluşturur), bir hidrolik güç paketi tarafından çalıştırılır. Hidrolik güç paketinin kalbi, pozitif deplasmanlı (sabit debili akış üretebilen tip) bir hidrolik pompadır. Modern ticari sistemlerdeki güç paketleri, programlanmış basınç artışı vb. sağlamak için genellikle mikro bilgisayarlar tarafından kontrol edilir. Hidrolik güç paketi, basınçla hidrolik yağı yoğunlaştırıcıya verir. Yön kontrol valfi kullanılarak yoğunlaştırıcı hidrolik ünite tarafından tahrik edilir. Su, yoğunlaştırıcının küçük silindrine doğrudan veya önce su basıncını tipik olarak 11 Bar'a yükselten bir takviye pompası vasıtasıyla gönderilebilir. Bazen su yumuşatılır veya "katkı ünitesine" uzun zincirli polimerler eklenir. Böylece yoğunlaştırıcı çalışırken yüksek basınçlı su verir. Daha büyük piston yoğunlaştırıcı içinde yön değiştirdikçe, dağıtım basıncında bir düşüş olacaktır. Bu tür düşmelere karşı koymak amacıyla, yüksek basınçtaki suyu barındırmak için dağıtım ünitesine kalın bir silindir eklenir. Bu, bir motorun volan çarkı gibi davranan ve su basıncındaki dalgalanmayı en aza indiren akümülatör olarak adlandırılır. Yüksek basınçlı su daha sonra esnek paslanmaz çelik borulardan kesme kafasına beslenir. Bu borular 4000 Bar (400 MPa) basınçlı suyu taşıyacak kadar dayanıklı, mafsallı ancak herhangi bir sızıntı olmayacak şekilde esnektir. Tipik boru çapı 6 mm'dir. Borulardan taşınan su, basınç ayarlayıcı üniteden geçerek kesme kafasına getirilir. Kesme kafası; su jetinin oluşturulduğu orifis, karıştırma odası (su ve aşındırıcı tanelerin karıştığı yer) ve odaklama tüpü veya ekinden oluşur. Şekil 1.3'te şematik olarak bir ASJ kesme kafası gösterilmektedir (URL-8, 2022).

Yüksek basınçlı su, küçük çaplı bir orifisten (0,2-0,4 mm) geçirilerek yüksek hızlı bir su jeti oluşturulur. Orifisler tipik olarak safirden yapılır. Ticari makinelerde safir orifisin ömrü genellikle 100-150 saat civarındadır. Karıştırma odası, genellikle 6 mm iç çap ve 10 mm uzunluğa sahip bir odacıktır. Yüksek hızlı su, orifisten karıştırma odasına verilirken, karıştırma odası içinde düşük basınç (vakum) oluşur. Aşındırıcı besleme tankı veya haznesinden aşındırıcı taneler de bir giriş vasıtasıyla karıştırma odasına verilir. Aşındırıcının birim zamanda beslenecek ağırlığı (aşındırıcı besleme miktarı), titreşimli besleyici veya dişli kayışlı besleyici gibi farklı teknikler kullanılarak ölçülüp ayarlanabilir. Karıştırma odasında aşındırıcı taneler ve su jeti karışır. Karıştırma işlemi sırasında, su fazından aşındırıcı faza momentum aktarımı nedeniyle aşındırıcı taneler kademeli olarak hızlanır. Karıştırma odasının hemen ardından odaklama tüpü veya ek parçalar gelir ve aşındırıcı-su karışımı jet bu tüpten geçerek hızla nozülünden dışarı çıkar. Nozül genellikle 0,8-1,6 mm iç çapa ve 50-80 mm uzunluğa sahiptir ve tungsten karbür gibi çok sert malzemelerden yapılır. Karıştırma

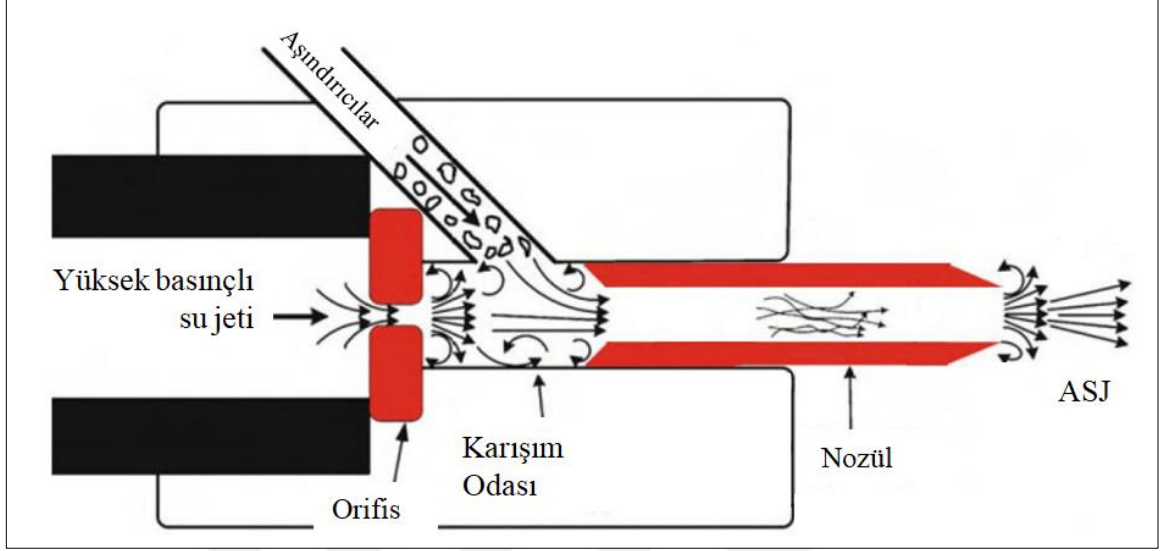
sırasında aşındırıcı taneler su jetine girmeye çalışır, ancak kaldırma kuvveti ve sürüklenme kuvvetinin etkileşimi nedeniyle saparlar. Aşındırıcı taneler, su jetinin momentumunu kullanarak hızlanana kadar jet ve karıştırma tüpünün iç duvarları ile etkileşime devam ederler. Nihai olarak odaklama tüpünden veya nozülünden gelen aşındırıcı su jeti, çeşitli malzemeleri kesmek/işlemek için kullanılabilir (URL-8, 2022).



Şekil 1.3. ASJ kesme kafası (Radovanovic, 2020).

Şekil 1.4'te, kesme kafasının içinde aşındırıcı su jetinin oluşumu görülmektedir. ASJ yönteminde basınç, ihtiyaca göre 150-700 MPa arasında sağlanabilmektedir. Kesme kafasının hareketi dıştan yağlanabilen, kızaklardan oluşan ve gövde içinde bulunan körüklerle korunaklı hareket sistemi tarafından sağlanmaktadır. Nozülünden çıkan yüksek basınçlı jetin çevreye zarar vermemesi ve kesilecek numunenin sabitlenmesi için sistemde bir de çalışma tezgâhı yer almaktadır. İşlenecek numune bu tezgâh üzerine, nozül ile belirli bir mesafede (nozül-numune mesafesi) yerleştirilir. Tezgâhta genelde ince ve dikey duran metal saclar bulunur. Ayrıca tezgâh altında, makine gövdesinin içinde aşındırıcı su biriktirilebilir ve daha sonra tekrar kullanılabilir. Sistemde bir de elektronik kontrol ünitesi

bulunmaktadır ve bilgisayarda programlanan kesim planı, kontrol paneliyle uygulanmaktadır (Kaya, 2016).



Şekil 1.4. Kesme kafasının içinde aşındırıcı su jetinin oluşumu (Çandar, 2012).

1.4.3. ASJ ile Kesme Mekaniği

ASJ dar iç hacimli odaklama tüpünden geçerken yüksek basınca sahiptir; nozülünden hızla çıktığı anda ise bu yüksek basınç, artık dar bir hacimde sıkışmayacağı için, atmosfer basıncına düşer. Bu sırada jetin hidrostatik enerjisi de enerjinin korunumundan hareketle kinetik enerjiye dönüşmektedir. Nozül çıkışındaki jetin hızı, Bernoulli eşitliğinden aşağıdaki gibi yazılabilir (Engin vd., 2013):

$$V_w = \eta \sqrt{2p/g_w} \quad (1.1)$$

Burada V_w , nozül çıkışındaki jetin hızı (m/sn); p , pompa basıncı (kPa); g_w suyun yoğunluğu (g/cm^3) ve η ise sürtünme gibi çeşitli kayıpları karakterize eden verim katsayısıdır.

ASJ ile kesmede, kesim işlemini yapan esas bileşen aşındırıcı tanelerdir. Bu tanelerin kesme işlemini yapabilmeleri için yeterli hıza sahip olmaları gerekmektedir. Taneler yüksek hıza sahip su jetiyle hızlandırılmaktadırlar. Kısa zamanda belirli hızlara ulaşmada

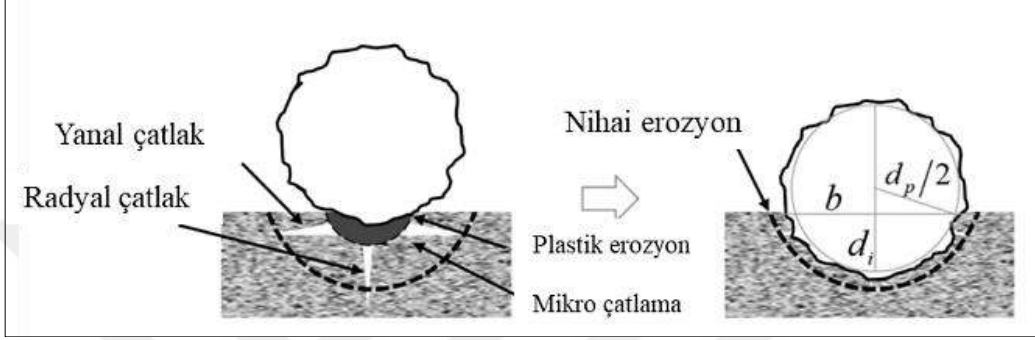
ivmelendirme süreci önem kazanmaktadır. Tanelerin ivmelendirilmesi yüksek hızlı su jetinden aşındırıcı tanelere momentum transferiyle olmaktadır. Aşındırıcıların sisteme girmesi ve ASJ oluşumu sırasında tanelerde küçülme ve şekil bozulması gibi bazı değişimler meydana gelmektedir. Taneler kesme kafası içerisindeki karışım odasında sahip oldukları hız ve açılara bağlı olarak çarpma (aşındırıcı-su, aşındırıcı-aşındırıcı ve aşındırıcı-karışım odası iç yüzeyi) etkisiyle kırılma-ufalanmaya maruz kalır. Buradaki boyut küçülmenin derecesi; karışım odasının geometrisi ve aşındırıcı tanelerin sahip oldukları çarpma hızıyla yakından ilişkilidir. Çarpma hızı arttıkça aşındırıcı tanelerin şeklinin de değiştiği ve keskin köşeli tanelerden kübik-yuvarlak tanelere geçiş gözlemlendiği tespit edilmiştir. Engin (2006), kesme kafasına giren aşındırıcı tanelerin %70-80'inin kırılma-ufalanma gösterdiğini belirtmiştir. Kırılma oranının aşındırıcının tane boyutu, jetin basıncı ve nozülün çapıyla ilişkili olduğunu ifade etmiştir. (Engin, 2006).

ASJ ile kesim işlemlerinde temel mekanizma, yüksek basınç ve hızdaki ASJ kullanılarak kesilecek numune yüzeyinden erozyon yoluyla malzeme uzaklaştırılmasıdır. Bu aşındırma işleminin performansı; başlıca ASJ makinesinin özelliklerine, kullanılan aşındırıcı ve kesilecek numunenin tipi ve özelliklerine bağlıdır. Kayaçlar saf su jetleriyle yeterli derinlikte kesilemediklerinden su jeti içerisine aşındırıcı katılarak ASJ oluşturulur. Dolayısıyla ASJ ile kayaç kesme süreçlerinde asıl kesme elemanı aşındırıcı tanelerdir. Yoğunluğu sudan yüksek olan aşındırıcılarla jetin kinetik enerjisi artacaktır. Ek olarak, çarpma-sürtünme sonucu jetin sağlayacağı abrasif aşındırma etkisi yüksek sertlikte aşındırıcılardan ötürü daha fazla olacaktır.

ASJ ile kesme süreçlerinde, her aşındırıcı tane bir mikro kesme işlemi yapmaktadır. Bu işlem sünek ve gevrek malzemelerde farklı mekanizmalarla açıklanmaktadır. Plastik akma, çatlatma-mikro kırıklar oluşturma, parça koparma, kazıma, çentileme gibi farklı şekillerde numuneden parçalar uzaklaştırılmaktadır. Sünek malzemelerde, kazıma ve mikro kesmeyi sağlayan aşındırıcı tanelerin numune yüzeyine düşük açılarda çarpmasıyla kesme işlemi gerçekleştirilir. Daha yüksek çarpma açılarında, numuneden uzaklaştırılan malzeme plastik akma şeklinde bir biçim gösterir. Gevrek malzemelerde ise çatlak oluşumu ve yayılması sonucunda meydana gelen kırılma neticesinde kesme işlemi gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.5), (Akkurt, 2002).

ASJ ile kesim esnasında suyun rolü ise henüz tam olarak anlaşılamamış bir olgudur. Suyun sürüklenen aşındırıcı taneler için bir taşıyıcı ve hızlandırıcı ortam olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Momber ve Kovacevic (1998), su akışının da (aşındırıcı

taneler haricinde) malzeme kaldırma işlemine doğrudan katkısı olduğuna dair deneysel kanıtlar sunmaktadır. Numune yüzeyine çarpan aşındırıcı tanelerin numunede mikro çatlaklar oluştururken, yüksek hızlı suyun da bu çatlaklara girerek hidrostatik kuvvet etkisi sağlayarak çatlakları genişlettiğini; böylece parçalanmayı ve dolayısıyla numuneden malzeme uzaklaştırmayı arttırdığını belirtmişlerdir (Momber ve Kovacevic, 1998).



Şekil 1.5. Gevrek malzemede aşındırıcı tanenin yarattığı erozyon (Cha vd., 2019).

ASJ ile kesme sırasında uzaklaştırılan malzeme miktarı, jetin kinetik enerjisiyle doğru orantılıdır. Belirli bir değerdeki kinetik enerjiyle numuneye çarpan ASJ, daha sonra eğer numune tamamen kesilmişse (kesme derinliği > numune kalınlığı), numuneyi yine belirli bir enerjiyle terk eder. Bu iki enerji arasındaki fark; çarpma, sürtünme, kesme vb. için harcanan enerjidir. Numune maksimum derinlikte kesilmesine rağmen, tamamen kesilememişse (kesme derinliği < numune kalınlığı), ASJ'nin kinetik enerjisinin tamamı kesme işlemi için kullanılmıştır (Ergür, 2007).

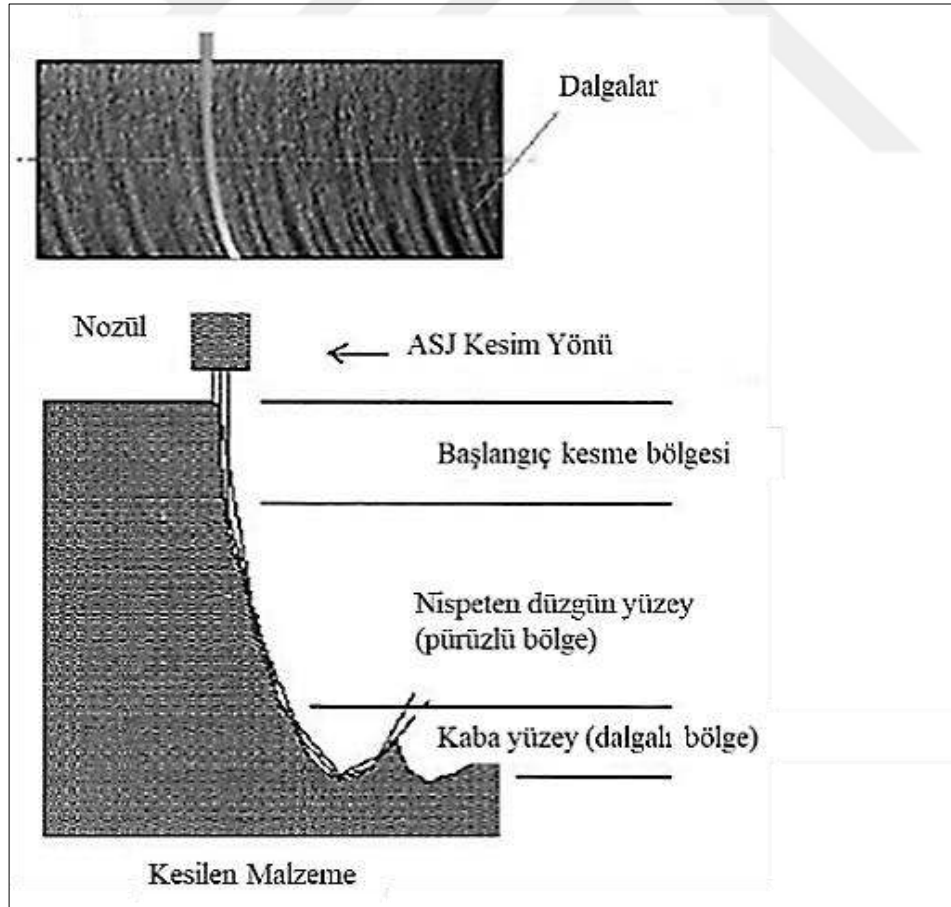
ASJ'nin kinetik enerjisi aşağıdaki formülle hesaplanabilir (Momber ve Kovacevic, 1998):

$$E_k = (m_a + m_w) V_w^2 (d_n / 2V_t) \quad (1.2)$$

Burada E_k , ASJ'nin kinetik enerjisi (J); m_a , aşındırıcı besleme miktarı (g/sn); m_w , su debisi (g/sn); V_w , nozül çıkışındaki jetin hızı (m/sn); d_n , nozül çapı (mm) ve V_t , kesme hızıdır (mm/sn).

Hashish (1988), ASJ ile kesilen bir numune yüzeyinde farklı iki bölge tanımlamıştır. Yarık (kerf) ağzından kesiğin dibine doğru kesimin üst bölgesini kesme-aşınma bölgesi ve bu bölgeyi kesiğin dibine doğru izleyen bölgeyi de deformasyon-aşınma bölgesi olarak

tanımlamıştır. Kesme-aşınma bölgesi aşındırıcı tanelerin kesilen numunenin yüzeyine dar açılarla çarpmaları sonucu oluşmaktadır. Bu bölgenin karakteristik yüzey özelliği pürüzlülüktür. Deformasyon-aşınma bölgesinde ise aşındırıcı taneler yüzeye geniş açılarla çarparlar. Bu kısımda aşınma bir karasızlık/düzensizlik sergiler. Dolayısıyla, bu bölgede karakteristik yüzey özelliği dalgalılıktır. Raju ve Ramulu'ya göre (1994) bu bölgeler arasındaki geçiş, su-aşındırıcı karışımının bölgesel kinetik enerjisindeki değişimin sonucu oluşmaktadır. Kesme derinliği boyunca kinetik enerjileri azalan aşındırıcı taneler su ve nozülün yatay hareketinin de etkisiyle numune yüzeyinde kaba dalgalı bir yapı oluştururlar. Bazı araştırmacılar (Momber ve Kovacevic, 1998; Chen ve Siores, 2001) ise kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgeleri arasında bir geçiş bölgesi tanımlamışlardır. Kesme derinliğinin başlangıcından itibaren belirli bir derinliğe kadar devam eden kavisli bölge de bazı çalışmalarda (Arola ve Ramulu, 1993; Valicek vd., 2007) başlangıç deformasyon bölgesi olarak tanımlanmıştır (Şekil 1.6).



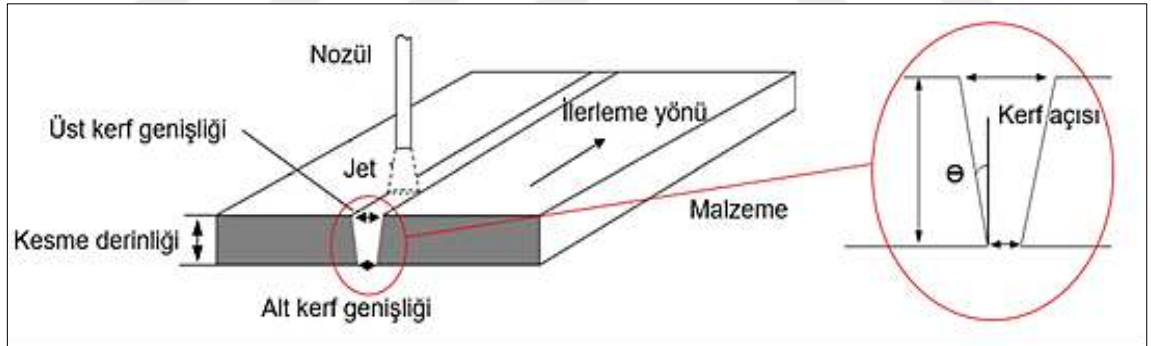
Şekil 1.6. ASJ ile kesme işlemlerinde oluşan yüzey profili (Saravanan vd., 2020).

1.4.4. Kesme Performans Ölçütleri

Kesme sonrası ölçülen ve/veya hesaplanan performans ölçütleri; malzeme uzaklaştırma oranı, kesme derinliği, kesme genişliği, kerf açısı, yüzey pürüzlülüğü-dalgallılığıdır. Malzeme uzaklaştırma oranı, kesilen numuneden birim zamanda uzaklaştırılan malzemenin miktarını belirlemektedir. Bu oranın yüksek olması kesimin daha etkili ve hızlı gerçekleştirildiğini gösterir. Böylece toplam kesilen malzeme başına harcanan spesifik enerji de düşmekte ve daha ekonomik bir kesme yapılmaktadır.

1.4.4.1. Kerf Açısı

ASJ ile kesmede yüksek basınçlı jet, kesilen numunenin yüzeyinden içine doğru genellikle genişliği azalan bir yarık (kerf) oluşturur (Wang ve Guo, 2003). Kerf derinliği ilgili numunenin tamamının kesilmesi durumunda kesme derinliğine eşit olmaktadır. Tipik bir kerf geometrisi Şekil 1.7’de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. ASJ kesme kerf profili şematik gösterimi (Shanmugam ve Masood, 2009).

Yarığın formunun sayısal bir göstergesi olan kerf açısı ASJ’nin performans değerlendirmesinde kullanılmaktadır. Kerf açısının 0 dereceye yaklaşması yarığın üst ve alt kısmındaki kesme genişliklerinin değerlerinin de birbirine yaklaşmasını; dolayısıyla daha dik bir kesim meydana gelmesini sağlayacağı için daha iyi bir kesme performansını belirtir. Yüksek kerf açıları ise yarığın üst ve alt noktasındaki kesme genişlikleri arasında yüksek fark olduğunun bir göstergesidir; dolayısıyla eğimli (V şekline yakın) bir yarığı ifade ettiğinden daha kötü bir kesme performansını gösterir (Aydın vd., 2010; Maros, 2012; Gupta

vd., 2013). Her bir kesime yönelik kesimin başladığı (giriş) ve bittiği tarafta (çıkış) oluşan yarıklar için kerf açıları hesaplanmalıdır. Kerf açıları Wang ve Guo (2003) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanabilir:

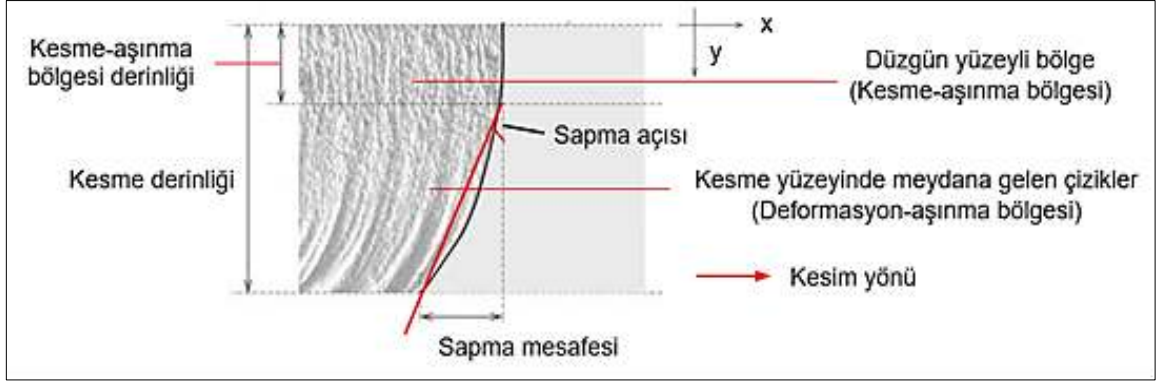
$$\Theta = \tan^{-1} [(W_{\text{üst}} - W_{\text{alt}}) / 2 h_k] \quad (1.3)$$

Burada; Θ : Kerf açısı (derece), $W_{\text{üst}}$: Üst kerf genişliği (mm), W_{alt} : Alt kerf genişliği (mm) ve h_k : Kerf derinliğini (mm) ifade etmektedir.

1.4.4.2. Kesme Genişliği ve Derinliği

ASJ'nin kesme performansının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer kriter ise kesme genişliğidir. Kesiğin genişliğinin az olması daha az malzeme kaybı açısından istenilen bir durumdur.

Kesme derinliğinin ise, artması iyi bir kesme performansına işaret etmektedir. ASJ ile kesme mekanizması irdelendiğinde, aşınan doğal taş yüzeylerinde iki tip aşınma bölgesi gözlenir. Şekil 1.8'de gösterildiği üzere bu bölgeler kesme-aşınma ve deformasyon-aşınma bölgeleri olarak isimlendirilmektedirler. Kesme-aşınma bölgesinde jet, kesim yüzeylerine düşük açılarla çarpmakta ve erozyon mekanizmasıyla numuneden malzeme uzaklaştırmaktadır. Bu bölge, küçük kavisli ve pürüzlülüğü az yüzeylere sahiptir. Deformasyon-aşınma bölgesinde ise kinetik enerjisi azalan jet daha yüksek açılarla kesim yüzeyine çarpmakta ve yüzeyi daha pürüzlü ve dalgalı bir hale getirmektedir (Kaya, 2016). Kesme derinliği bu iki bölgenin toplam derinliğini ifade etmektedir. Başka bir deyişle, kesim yüzeyi ile kesilen numunenin içine doğru oluşan yarığın en dip noktası arasındaki dikey mesafe kesme derinliği olarak tanımlanmaktadır. Kesme derinliğiyle ilişkili olan kesme-aşınma bölgesinin derinliği de kesme performansı açısından referans alınabilir. Bu bölgenin kesme yüzeyi içerisindeki payının artması kesme sonunda daha kaliteli yüzeylerin elde edilmesi açısından önemlidir.



Şekil 1.8. Çizik geometrisinin şematik gösterimi (Lebar ve Junkar, 2014).

1.4.4.3. Yüzey Pürüzlülüğü-Dalgallığı

Yüzeyin makro ölçekte aşınma karakterizasyonunda, ASJ tarafından kesim yüzeylerinde oluşturulan çizikli/dalgalı yapı profilinde ölçülebilen çizik sapma açısı da (Şekil 1.8), önemli bir performans göstergesidir. Yüzeyde kesme derinliğine paralel oluşan çizikli yapılar, yaklaşık olarak kesme-aşınma bölgesinden kesme deformasyon bölgesine geçildiğinde düz bir hattan, kesimin ilerlediği yönün tersine doğru saparlar. Bu sapmanın derecesini gösteren sapma açısının daha düşük olması, daha iyi bir kesme performansına işaret eder (Wang vd., 2021). Zira çok yüksek açılarda oluşan sapmalar yüzeyin dalgallılığını/pürüzlülüğünü arttıracak, bunları düzeltmek için uygulanacak ikincil işlemlerin maliyeti ve süresi artacaktır.

Sapma açısı aşağıdaki formülle belirlenebilir:

$$\beta = \tan^{-1} (l_s/h_t - h_a) \quad (1.4)$$

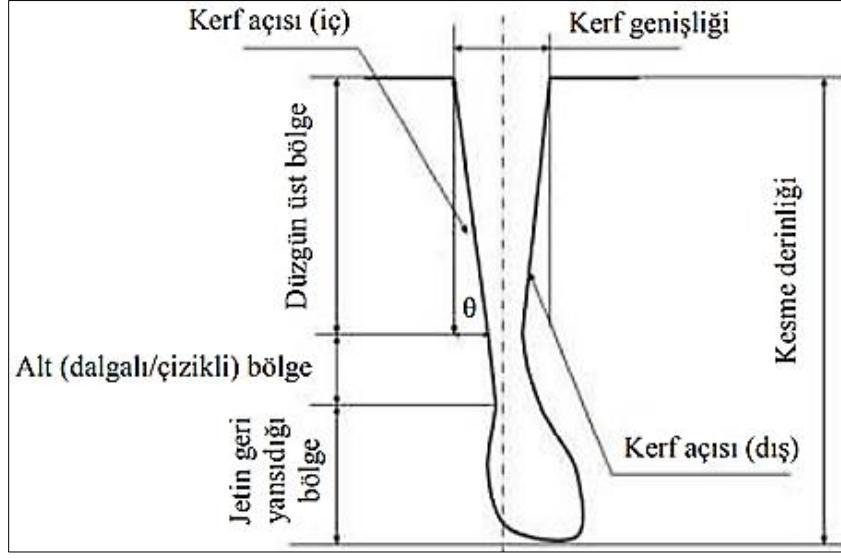
Burada β : Sapma açısı (derece), l_s : Sapma mesafesi (mm), h_t : Kesme derinliği (mm) ve h_a : Kesme-aşınma bölgesi derinliğini (mm) ifade etmektedir.

Yüzey dalgallılığı-pürüzlülüğü de akışkan-malzeme etkileşiminin belirlenmesi ve bu etkileşimin yüzeyde meydana getirdiği tahribatların değerlendirilebilmesi açısından önem arz etmektedir. Yüzey dalgallılığı, geniş düzensizliklerle belirlenir ve kesme için gerekli enerjinin yetersizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü ise yüzeyin mikron düzeyindeki çukur-tümsek profiliyle ilgilidir. Ayrıca, pürüzlü yüzeylerin düzeltilmesi için ikincil işlemlere ihtiyaç duyulacağından daha düşük pürüzlülüğe sahip

yüzeylerin elde edilmesi, istenilen bir durumdur. Kesme yüzeyindeki dalgalılık/çiziklilik jetin sahip olduğu enerjinin malzemeyi kesmek için gerekli olan enerjiden daha küçük olmasından kaynaklanan bir durumdur. Çünkü ASJ kesme anında numune kalınlığı boyunca ilerlerken sahip olduğu enerjiyi kaybederek kesme işlemini gerçekleştirir. Jetin etkin gücü numunenin alt kısımlarına doğru azalır. Ayrıca kesme yüzeylerinde oluşan dalgalı/çizikli yapı, jet içerisindeki ve kesme sistemindeki türbülansın kaynaklanabilmektedir (Guo vd., 1993; Chao vd., 1995; Xu, 2005; Karakurt, 2011; Kaya, 2016).

Kesim yüzeylerinde pürüzlülük ölçümü için çeşitli yöntem ve cihazlar bulunmaktadır. Genellikle, pürüzlülük için kullanılan parametreler R_a (aritmetik ortalama sapma), R_q (aritmetik ortalama sapmaların karekökleri) ve R_z (maksimum pürüzlülük derinliği) değerleridir. Bu değerler belli bir ölçme uzunluğu (çizgisi) boyunca yüzeydeki mikro çukur/tümseklerin derinlik ve yüksekliklerinin hesaba katıldığı formüllerle elde edilirler. Ölçüm hattı, bir koordinat sistemindeki x eksenini ($y = 0$) olarak kabul edilirse; R_a değeri, bir ölçme uzunluğu boyunca çukur ve tümseklerin y-koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. İstatistiksel olarak değerlendirilirse, R_a aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünün y-koordinatlarının merkez hattında ortalama aritmetik sapmasını tanımlar. Y-koordinatlarının kareköklerinin ortalama değeri ise R_q 'yu vermektedir. R_q , verilen alana dağıtılmış profil çıkıntıları ve boşluklarındaki standart sapmayı ifade eder. R_q değeri R_a 'dan daha büyüktür. R_z ise, yüzeyde taranan bir çizgideki en yüksek tümseğin yüksekliği (R_p) ile en derin çukurun derinliği (R_v) arasındaki mesafeyi verir ($R_z = R_p + R_v$) (Kaya, 2016).

ASJ ile kesimde oluşan yarık, her ne kadar genellikle yüzeyden derine doğru daralan “V” şeklinde bir yapıya sahipse de bu geometri bir derinlikten sonra bozularak düzensiz bir bölge oluşturur. Bu, yarığın en dibindeki kısma jetin geri yansıdığı bölge ya da çakılma bölgesi denilmektedir (Şekil 1.9). Bu bölgede yüzeyler iyice bozulduğundan dolayı bölgenin alanının az olması arzu edilir. Dolayısıyla çakılma bölgesi genişliği ve derinliğinin az olması da daha iyi bir kesme performansına işaret eder.



Şekil 1.9. ASJ ile kesimde oluşan kerf profili (Liu, 2004; Karakurt, 2011).

1.4.5. ASJ'nin Kesme Performansını Etkileyen Faktörler

ASJ kesme yönteminde kesme performansını etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlardan bazıları sistemle/cihazla ilgili olup kesme işlemleri öncesinde seçilebilen/ayarlanabilen parametrelerdir. Bunların başlıcaları; jet basıncı, kesme hızı, nozül-numune mesafesi ve aşındırıcı besleme miktarıdır. Ek olarak, nozül çapı ve uzunluğu, orifis çapı gibi makine bileşenleri ile ilgili özellikler de kesme performansı üzerinde etkilidir. Kesilen numunenin özellikleri ve kullanılan aşındırıcının çeşidi de kesme performansını etkilemektedir (Kaya, 2016).

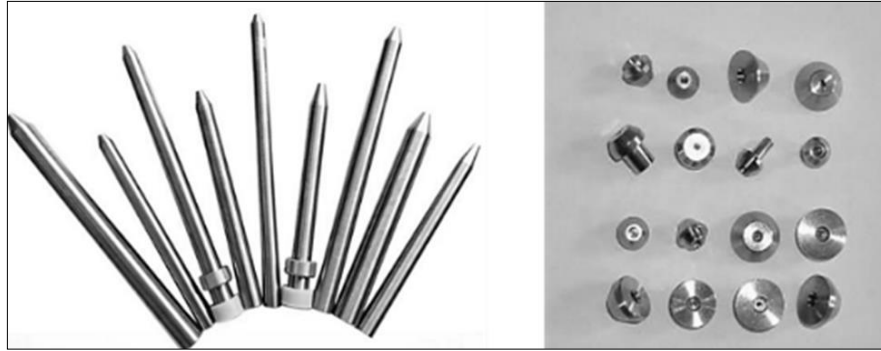
1.4.5.1. Kesme Parametreleri

Pompa basıncı ya da jet basıncı, kesimin performansını etkileyen en önemli hidrolik parametrelerdendir. Eşik bir basınç değerine kadar artan basınçla birlikte malzeme uzaklaştırma oranı artmaktadır. Bir numunenin kesilmeye başlaması için gereken en küçük basınç değerine eşik basınç denilmektedir. Bu değer, diğer parametrelere ve işlenecek numunenin özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterir. Basıncın artırılması kesme hızının ve beraberinde üretim hızının artırılmasına olanak sağlamaktadır. Bu da ekonomik açıdan önemlidir. Zira üretim hızı arttığında kesilen her numune için harcanan zaman kısılacak, bu da her numunenin daha az enerji harcanarak kesilmesini sağlayarak işletme maliyetini

düşürecektir. Diğer yandan, pompa basıncının artışı yüzey kalitesini kötüleştirmekte ve pürüzlülük değerlerini arttırmaktadır. Kullanılabilecek maksimum pompa basıncı değeri başlıca makine motor gücüne ve pompa özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. İşlenecek malzemenin özelliklerine ve diğer etmenlere bağlı olarak 700 MPa seviyesine kadar çıkabilen pompa basıncı değerlerinde kesim yapılabilir. Genel olarak 150-400 MPa pompa basıncı değerlerinde kesimler gerçekleştirilmektedir (Hashish, 1989; Summers, 1995; Karakurt, 2012; Kaya, 2016).

Orifis ve nozül çapı-uzunluğu da kesme performansı üzerinde etkili hidrolik parametrelerdendir. Jetteki aşındırıcıların hızı, aşındırıcı-su karışımının yoğunluğuyla doğru orantılıdır. Orifis ve nozül çapının artmasıyla birlikte akışkan yoğunluğu düşmekte ve bu da aşındırıcı tanelerin hızını azaltmaktadır. Nozül çapının çok küçük olması durumunda ise aşındırıcı taneler birbirleriyle-nozül duvarıyla etkileşmekte ve sonuç olarak tanelerin hızları azalmaktadır. Dolayısıyla, tanelerin daha hızlı devinimini ve yüksek kinetik enerjinin oluşumunu sağlayan bir nozül çapı seçmek gerekmektedir. Nozül çapının orifis çapına oranının 3-4 arasında olması önerilmektedir. Orifis ve nozül çapları sırasıyla 0,18-0,40 mm ve 0,8-1,6 mm'dir (Blickwedel, 1990; Pi, 2008). Jetin düzenli bir şekilde ivmelenmesini sağlayan belirli bir nozül uzunluğuna kadar, malzeme uzaklaştırma oranı doğrusal olarak artmaktadır. Bu uzunluk değerinden sonra ise artan sürtünmenin bir sonucu olarak jetin hızı azalmaktadır. Bu da malzeme uzaklaştırma oranında azalmaya yol açmaktadır. Dolayısıyla optimum bir nozül uzunluğu belirlenmesi gerekmektedir. Optimum nozül uzunluğunun, nozül çapının 25-50 katı olması önerilmektedir. Piyasada genellikle 50-80 mm uzunluğunda nozüller kullanılmakla birlikte aşınma, maliyet ve kullanım ömrü açısından ise 76 mm uzunluğundaki nozüllerin kullanılması önerilmektedir (Blickwedel, 1990; Pi, 2008).

Şekil 1.10'da farklı çap ve uzunlukta nozül ve orifisler görülmektedir.



Şekil 1.10. Farklı çap/uzunlukta nozüller ve orifisler (URL-9).

Kesme işlemi ile ilgili parametrelerden bir diğeri olan kesme ya da ilerleme hızı, kesme kafasının kesme hattı boyunca birim zamanda aldığı yoldur. Kesme hızı, malzeme uzaklaştırma oranı ile doğrudan ilişkilidir. Jet, nozülünden sürekli aktığı için numunenin her bir parçasını aşındırmak için harcanan zaman önemlidir. Diğer parametreler sabitken kesme hızındaki artışla birlikte malzeme uzaklaştırma oranı azalmaktadır. Çünkü jet bir noktada ne kadar uzun kalırsa, kesim o kadar derin olur. Bu nedenle kesme hızı, malzeme uzaklaştırma oranının elde edilmesinde önemli bir role sahiptir. Sabit bir malzeme uzaklaştırma oranı için kesme süresince sabit bir hızı korumak önemlidir. Bunun yanında, kesme hızının artmasıyla kesme yüzeyi kalitesi kötüleşmektedir. Yanal hızı artan jetin kesimin içindeki türbülansı da artmakta, bu da kesim yüzeylerinde pürüzlülük ve dalgalılığı artıracak dinamikleri doğurmaktadır. Ek olarak, kesme hızındaki artış kerf açısını da arttırmaktadır. ASJ uygulamalarında kesme hızı genellikle 50-500 mm/dk aralığındadır (Hasçalık, 2007; Karakurt vd., 2010a; İnal, 2011; Çandar, 2012; Karakurt, 2012; Oh ve Cho, 2014; Arab ve Celestino, 2017).

Diğer bir kesme parametresi olan nozül-numune mesafesi ise nozülün çıkış ucu ile işlenecek numune arasındaki dik mesafeyi ifade eder. Nozül-numune mesafesi, kesimin performansı üzerinde oldukça önemli bir parametredir. Bu mesafe arttıkça jetin boyu ve numune yüzeyine doğru olan genişliği artmaktadır. Jetteki yayılımla birlikte numune birim yüzeyine etkiyen aşındırıcı yoğunluğu da düşmektedir. Bu da kesme genişliğinin artmasına ve kesim yüzeyinin kalitesinin kötüleşmesine (pürüzlülüğün artmasına) neden olmaktadır. Nozül-numune mesafesindeki artış kerf açısını da arttırmaktadır. Ayrıca, daha fazla mesafe kat edeceği için hızı ve kinetik enerjisi azalacak olan jet, numune yüzeyine daha düşük kuvvetlerle çarpacaktır. Bunun sonucunda da malzeme uzaklaştırma oranı düşecektir. Ancak, nozül-numune mesafesi çok düşük olursa nozülünden çıkan jet içerisindeki aşındırıcıların numuneye temas edene kadar ivmelenmesi için yeterli zaman oluşmayacaktır. Bu da elde edilebilecek maksimum kinetik enerjiye ulaşamaması anlamına geleceğinden maksimum kesme performansı elde edilememesine neden olur. Oh ve Cho (2016); nozül ile numune arasında yer alan akışkan jet kolonunun, etkili ve etkisiz erozyon bölgesi olarak iki kısma ayrılabilceğini belirtmişlerdir. Nozül-numune mesafesi etkili erozyon aralığında olduğunda, yüksek hızlı aşındırıcı taneler, numunelerin maksimum aşınmasına neden olmaktadır. Buna karşılık, aşındırıcı tanelerin hızının önemli ölçüde azalmasından dolayı etkisiz erozyon bölümünde numuneyi aşındırma nadiren gözlenmektedir. Nozülünden çıkan ASJ'nin numune yüzeyine ilk temas ettiği anda bir erozyon bölgesi oluşmaktadır.

Maksimum ASJ kinetik enerjisi elde etmek için bu bölgenin yarıçapı, etkili erozyon bölgesinin sınırları aralığında olmalıdır. Ayrıca çok düşük nozül-numune mesafesinde; kesilen malzemeyi de beraberinde taşıyarak numune yüzeyinden geri yansıyan jet (eğer kesme derinliği < numune kalınlığı ise), kesme işlemi yapacak (nozülden numuneye akmaya devam eden) jetin devamıyla çarpışıp karışarak dağılmasına neden olabilir. Bu da numune yüzeyinde erozyon bölgesi alanını arttırarak ve ayrıca türbülanslar oluşturarak kesme performansını olumsuz etkiler. Oluşan türbülanslar emniyet açısından da olumsuz bir durum oluşturabilir (jet ve kayaç parçaları sıçrayabilir). Dolayısıyla maksimum jet kinetik enerjisi elde etmek için optimum bir nozül-numune mesafesi ayarlanmalıdır. ASJ uygulamalarında nozül-numune mesafesi genellikle 1-10 mm arasında kullanılmaktadır (Guo vd., 1993; Aydın vd., 2010; İnal, 2011; Çandar, 2012; Karakurt, 2012; Oh ve Cho, 2014 ve 2016; Madara vd., 2019).

Aşındırıcı besleme miktarı ve su debisi de kesme performansını etkileyen kesme parametrelerindendir. Su akış hızı, aşındırıcıların hızlandırılmasında önemli bir role sahiptir. Ancak belirli bir noktadan sonra su debisinin arttırılması, malzeme uzaklaştırma oranındaki artışın yavaşlamasına neden olmaktadır. Ayrıca çok yüksek su debisi çevresel olarak da (yüksek hızda geri yansıma, kesilen malzeme parçacığı sıçratma) tehlikeli olabilmektedir. Ek olarak, sabit aşındırıcı besleme miktarında su debisi arttırıldığında aşındırıcı tanelerin jet içerisinde birim hacimdeki miktarı azalacağından ASJ'nin yoğunluğu ve dolayısıyla toplam enerjisi azalır. Dolayısıyla, belli bir su debisi değerinin aşılması gerekir. Kesilen numuneye giren aşındırıcı miktarı ve jetin kinetik enerjisi aşındırıcı besleme miktarı ile belirlenir. Bu, yüksek aşındırıcı besleme miktarının kesme performansında öngörülen bir artışa sahip olmasına yol açar. Ancak, aşındırıcı besleme miktarındaki artış için bir eşik değeri vardır. Bu değer aşıldığında, kesme performansında kötüleşme (kesme derinliği/malzeme uzaklaştırma oranında azalma) meydana gelmektedir. Çok fazla aşındırıcı tane, jet içinde birbirlerine ve kesme kafası ve kesilen numunenin iç çeperlerine daha fazla çarparak küçülürler, dolayısıyla kinetik enerjileri düşer. Bunun yanında, aşındırıcı besleme miktarının belirli bir değere kadar artışı ile yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlar. Kesim yüzeyini aşındıran aşındırıcı taneler peşi sıra derinlere doğru ilerlemekte ve yüzey kalitesi kademeli olarak iyileştirilmektedir. Ancak, jette çok fazla aşındırıcı tane bulunduğunda bu taneler aşırı sürtünmeden dolayı parçalanarak küçük boyutlara ayrılmakta ve sahip oldukları kinetik enerjileri kaybetmektedirler. Bunun sonucunda da yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Aşındırıcı besleme miktarı ASJ uygulamalarında genellikle 100-

600 g/dk aralığında seçilmektedir (Pi, 2008; İnal, 2011; Karakurt, 2012; Çetin, 2021; Panchal ve Shaikh, 2021).

Kesme parametrelerinin kesme performans ölçütleri üzerindeki etkileri ve bu etkilerin şiddeti farklılık arz etmektedir. Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalar sonucu, bazı bağımsız parametrelerin bağımlı parametreler üzerindeki etkisini göstermek için oluşturulmuş bir skala, Tablo 1.2’de verilmektedir.

Tablo 1.2. ASJ kesme parametrelerinin etkileri ve dereceleri (Valicek vd., 2011).

Performans Ölçütleri	ASJ Kesme Parametreleri							
	Jet basıncı	Orifis çapı	Nozül çapı	Nozül uzunluğu	Aşındırıcı besleme miktarı	Aşındırıcı havutu	Aşındırıcı tipi	İlerleme hızı
Malzeme uzaklaştırma oranı	3	3	2	1	3	2	2	3
Kesme derinliği	3	3	2		3	2	2	3
Kesme genişliği	1		3		1			
Yüzey dalgalılığı	2	2	1	1	2	1	1	2
Yüzey pürüzlülüğü	2	2			1	3	2	2

1: az-orta etki, 2: yüksek etki, 3: çok yüksek etki

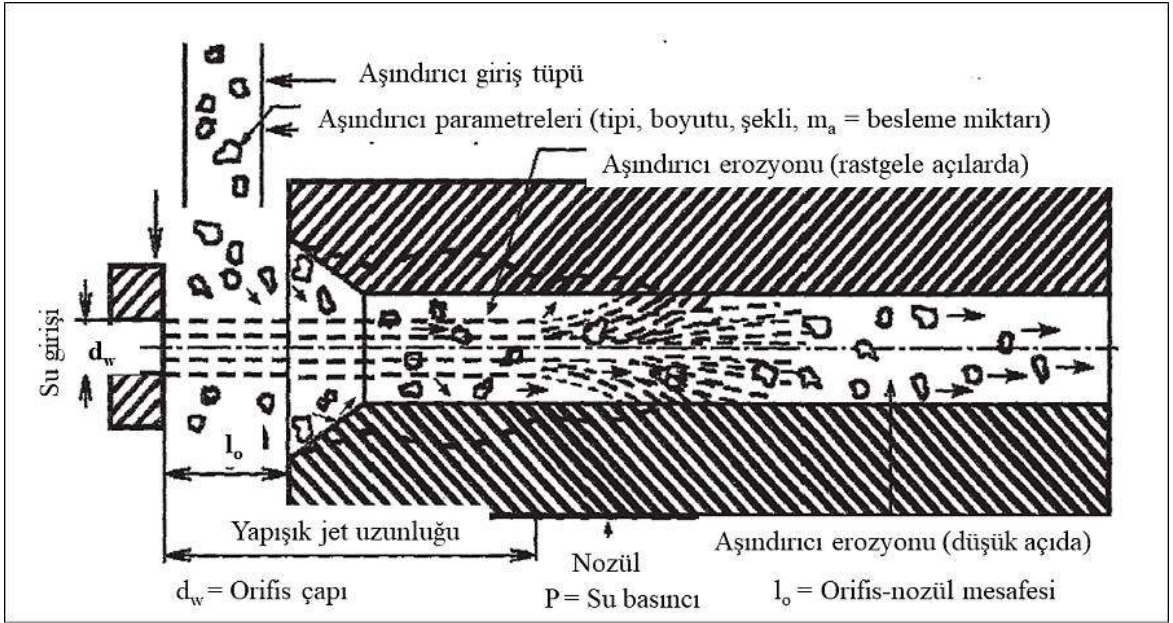
ASJ ile kesim işlemlerinde makinenin özellikleri, kesilecek numunenin türü ve özellikleri, yapılacak işlem sonucunda istenen özellikler (derin kesim ya da yüzeyin pürüzsüz olmasının daha önem arz etmesi) vb. gibi birçok durum göz önünde bulundurularak kesme parametreleri seçilmelidir. Ayrıca her parametrenin diğerinden etkilendiği de göz önünde bulundurularak en verimli sonucu elde etmek için tüm parametrelerin optimizasyonunun önemli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

1.4.5.2. Aşındırıcı Tipi ve Özellikleri

Kullanılan aşındırıcının çeşidi de kesme performansını etkilemektedir. Aşındırıcının sertliği arttıkça aşındırıcı sertliğinin numune sertliğine oranı artacaktır. Bu oranın artmasıyla da malzeme uzaklaştırma oranı artmaktadır. Ayrıca sert aşındırıcıların jet içerisinde ivmelenme sırasında kırılarak keskin köşeler oluşturma mekanizması, düşük sertlikteki

aşındırıcılara oranla daha iyidir. Bu da kesme işlemini kolaylaştırır. Dolayısıyla, daha sert aşındırıcıların kesme performansını arttırması beklenir, ancak nozül aşınması da artarak ömrü kısalmır. Bu da işlem maliyetini arttırır. Artan aşındırıcı sertliğiyle kesme yüzey kalitesi iyileşmekte ve kesme genişliği azalmaktadır (Hashish, 1989; Babu ve Krishnaiah, 2003; Karakurt vd., 2010a; İnal, 2011; Karakurt, 2011; Saraçyakupoğlu, 2012; Kaya, 2016; Oh ve Cho, 2016; Hlavacova ve Geryk, 2017; Aydın vd., 2019; Perc vd., 2019; Çetin, 2021).

Şekil 1.11’de bir ASJ nozülünün aşınma mekanizması ve bu aşınmayı etkileyen parametreler verilmiştir.



Şekil 1.11. ASJ nozülünün aşınma mekanizması ve etkili parametreler (Akkurt, 2002).

Aşındırıcı boyutu da kesme performansı üzerinde etkiye sahiptir. Artan aşındırıcı boyutu, bir seviyeye kadar jetin kinetik enerjisini yükselterek malzeme uzaklaştırma oranını arttırmaktadır. Aşındırıcı boyutunun ileri seviyedeki artışlarında aşındırıcı tanelerin kesme kafası içerisinde çarpışma olasılığı artmaktadır. Böylelikle, aşındırıcı taneler fazla miktarda parçalanmaktadır. Sonuç olarak, aşındırıcı tanelerin kinetik enerjileri düşmekte ve malzeme uzaklaştırma oranı azalmaktadır. Ayrıca, iri taneli aşındırıcıların kullanıldığı kesimlerde aşındırıcı besleme hortumu ve nozülde tıkanmalar meydana gelebilmektedir. En iri tane boyutu, nozül çapının yarısından daha küçük olmalıdır. Aşındırıcı boyutunun azalmasıyla da yüzey pürüzlülüğü ve kesme genişliği azalmaktadır. Birbirlerine yapışan ya da şlam

boyutu ($<20 \mu\text{m}$) aşındırıcı taneler de tıkanmalara (aşındırıcı beslenen hortumda ve nozül içerisinde) sebep olabilirler (Coşansu, 2010; İnal, 2011; Karakurt, 2011; Kaya, 2016).

Aşındırıcı yoğunluğunun artması da kinetik enerjiyi arttıracığı için bir seviyeye kadar malzeme uzaklaştırma oranını artırır. Ancak, çok yüksek yoğunluğa sahip aşındırıcı taneler su ile hareket etmekte zorlanırlar ve nozül çıkışında sudan ayrışabilirler. Bunun sonucunda da malzeme uzaklaştırma oranı azalmakta, kesme genişliği ve yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Bir diğer aşındırıcı özelliği de aşındırıcının tane şeklidir. Aşındırıcıların sahip olduğu keskin köşeler kesme esnasında yüksek kesme kuvveti sağlar. Bu durum, malzeme uzaklaştırma oranının artmasını sağlar. Buna karşın küresel tanelerle daha iyi kesme yüzeyleri elde edilir (Karakurt, 2011; Saraçyakupoğlu, 2012; Kaya, 2016; Oh ve Cho, 2016; Hlavacova ve Geryk, 2017; Aydın vd., 2019; Perc vd., 2019; Çetin, 2021).

ASJ uygulamalarında aşındırıcı olarak genellikle garnet kullanılmaktadır. Garnetin yoğunluğu yaklaşık 4 gr/cm^3 ve sertliği 7-7,5 Mohs civarındadır. Sivri olmayan, kavisli köşeler içeren tane şekline sahiptir. Bununla birlikte literatürde alüminyum oksit, silisyum karbür, olivin, cam gibi farklı malzemelerin aşındırıcı olarak kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Agus vd., 1995; Axinte vd., 2009; Coşansu ve Coğun, 2012; Cha vd., 2021). ASJ uygulamalarında, genellikle 80 mesh ($177 \mu\text{m}$) tane boyutunda aşındırıcı kullanılmasına rağmen bu durum kesilecek numunenin ve makinenin özelliklerine göre farklılık gösterebilir. Aşındırıcıların fiyatı da ASJ işletme maliyeti açısından önem arz etmektedir. Aşındırıcı seçiminde aşındırıcı, malzeme, makine özellikleri ve yapılacak işlemin niteliği göz önüne alınarak değerlendirmeler yapılmalıdır (İnal, 2011; Karakurt, 2011; Kaya, 2016; Aydın vd., 2019).

1.4.5.3. Numunenin Özellikleri

Numunenin fiziksel (sertlik, yoğunluk vb.), mekanik (basınç, çekme dayanımı vb.) ve kimyasal özellikleri ASJ'nin kesme performansını etkilemektedir.

Aşınma mekanizmasındaki en önemli faktör, etkileşimde bulunan iki malzemenin (aşındırıcı ve aşınan malzeme) sertlikleri arasındaki farktır. Bu fark ne kadar büyük olursa, aşındırma işlemi o kadar verimli olur. Dolayısıyla doğal taşların sertliği arttıkça ASJ'nin malzeme uzaklaştırma oranı da azalmaktadır. Bunun yanında, su-aşındırıcı karışımdan oluşan jetin kayaç numunesini kesebilmesi için numune yüzeyine çarptığında uyguladığı kuvvetin kayacın basınç dayanımından büyük olması gerekir. Başka bir deyişle numune;

yüzeyine çarpan jet, numunenin basınç dayanımını aştığı anda kesilmeye başlar. Çeşitli kayaçların ASJ ile kesilmesini konu alan çalışmalarda (Vie, 1983; Agus vd., 1993; Engin, 2012; Oh ve Cho, 2014), kayaç dayanımının artmasıyla spesifik enerjinin arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle, kayaç dayanımının artmasıyla malzeme uzaklaştırma oranı azalmaktadır. Kayaçların aşınma dayanımı için de öngörülebileceği gibi benzer bir durum söz konusudur. Zaten ASJ ile kesme temelde bir aşındırma işlemidir. Aşınma dayanımı yüksek olan kayaçlarda daha düşük malzeme uzaklaştırma oranı elde edilir. Ek olarak, birim hacim başına kütlesi yüksek olan bir kayaçta, kesme işleminde ağırlıkça daha fazla malzemenin aşındırılması gerekecektir. Bu durum birim hacim ağırlığı (veya yoğunluğu) yüksek olan kayaçlardan daha az malzemenin uzaklaştırılması anlamına gelir. Diğer bir kayaç özelliği olan porozite ya da gözeneklilik, kayaçtaki gözenek hacminin toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Kesme işleminde jet, gözeneklerde katı kısma göre daha hızlı hareket edeceğinden (aşınacak ve uzaklaştırılacak malzeme olmayacağından) doğal olarak, artan porozite değerleri ile malzeme uzaklaştırma oranı artacaktır. Su emme kapasitesi ise, yine porozite ile yakından ilgilidir. Bu değer, kayacın gözeneklerindeki boşluklara su dolmasının bir ölçütüdür. Bir kayacın su emme oranının yüksek olması onun daha fazla kırık-çatlak ve gözeneklere sahip olabileceği anlamına gelir. Bu nedenle, su emme kapasitesi ile malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki ilişki, gözeneklilik ile malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki ilişkiye benzerdir (Vie 1983; Agus vd., 1993; Momber ve Kovacevic 1997; Engin, 2006, 2012; Karakurt, 2011; Karakurt vd. 2012a; Oh ve Cho, 2014, Ünal ve Altınok, 2019).

İri taneli kayaçlarda ince taneli kayaçlara oranla belirli bir alanda daha az mineral bulunur ve bu taneler arası sınırın da az olması anlamına gelir. Böylelikle iri taneli bir kayaçta kayacın kesilmesi anında jet-aşındırıcı karışımı, kayacın kesilmesi için daha çok taneler boyunca nüfuz etmek zorunda kalır. Taneli kayaçlarda kopmanın/kesilmenin tane sınırlarından daha kolay gerçekleştiği göz önüne alındığında, iri taneli kayaçlarda daha düşük malzeme uzaklaştırma oranları elde edilir. Bundan dolayı, ince taneli kayaçlarda daha yüksek kesme genişlikleri oluşur. İri taneli kayaçlarda kesme süresince bir veya birkaç taneye nüfuz eden ASJ, az sayıda taneyle temas etmiş olduğu için daha düzenli bir kesme yapar. Dolayısıyla alt ve üst yarık arasında daha düşük bir fark oluşur. Bağlı olarak kerf açıları düşecektir. Ek olarak; mineral tane boyutu, dizilim şekli ve taneler arası sınır nedeniyle iri taneli kayaçlarda kesim yüzeylerinde daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilir (Karakurt, 2011; Aydın vd., 2012; Karakurt vd. 2012a ve 2012b).

1.4.5.4. Diğer

Nozülün kesme açısı (dik ya da açılı kesim), çoklu geçişli kesim ve titreşimli kesim gibi uygulamalar da ASJ'nin kesme performansını etkilemektedir. Hashish (1989), aynı kesim hattı üzerinde birden fazla geçiş yapılan çoklu kesimde, belirli bir geçiş sayısına kadar malzeme uzaklaştırma oranının arttığını belirtmiştir. Ayrıca gevrek malzemelerde en yüksek kesme derinliğinin 90° açılarda elde edildiği, ilgili literatürde belirtilmiştir (Hashish, 1989; Engin, 2012; Çetin, 2021).

1.4.6. Aşındırıcılar

Sertliği, kendisinden daha düşük bir madde ile etkileşimde bulunduğu çarpma, sürtünme vb. yollarla parçalar koparan, malzeme uzaklaştıran materyallere aşındırıcı denilmektedir. Aşındırıcılar endüstride birçok alanda farklı çeşit, şekil ve boyutlarda kullanılmaktadır. ASJ ile kesme işlemlerinde öğütülmüş, küçük tane boyutunda (genellikle 80 Mesh) aşındırıcılar kullanılmaktadır. Aşındırıcıların kesme performansı; aşındırıcıların sertlik, yoğunluk, tane boyu ve şekli gibi özellikleriyle değişmektedir (Hallaçoğlu, 1999).

Aşındırıcılar, genellikle doğal ve yapay olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılırlar. Doğadan direkt elde edilen ya da atık nitelikli olanlar doğal aşındırıcılarken, fabrikasyonla çeşitli işlemlerden geçirilerek üretilenler yapay olanlardır. Dolayısıyla doğal aşındırıcılar, homojenlik ve saflık (istenmeyen malzemeler içermemesi) konusunda yapay aşındırıcılara göre dezavantajlıdır. Atık bertarafı gibi çevresel konular ve maliyet açısından (yapay aşındırıcılar pahalı) ise daha avantajlıdırlar. Garnet, korund, elmas, kuvars, olivin gibi sert doğal mineraller; granit gibi sert kayalar, deniz ve nehir kumları gibi doğal malzemeler; cam, ferrokrom ve bakır fırını cürufları gibi doğada atık halde bulunabilecek malzemeler doğal aşındırıcılara örnek verilebilir. Bunlar yalnızca, kırma-öğütme-yıkama-kurutma gibi fiziksel işlemlerden geçirilerek kullanıma hazır hale getirilebilirler. Silisyum karbür, cam küre, alüminyum oksit, yapay elmas, bor karbür ve metal parçaları gibi malzemeler ise yapay aşındırıcılara örnek verilebilir. Bunlar fırınlarda ergitme, çözündürerek sentezleme gibi süreçlerden ve fiziksel-kimyasal işlemlerden geçirilerek hazırlanırlar. Yapay aşındırıcılar, modern endüstri için büyük öneme sahiptirler ve yüksek kaliteli aşındırıcılar alanında piyasada baskın durumdadırlar (DPT, 1995; Kulaksız, 2012; Kaya, 2016).

ASJ ile kayaç kesme işlemlerinde büyük bir çoğunlukla aşındırıcı olarak garnet (Şekil 1.12) kullanılmaktadır. Diğer tercih edilen aşındırıcılar ise olivin, alüminyum oksitler ve silis kumudur. Aşındırıcı malzemenin seçiminde; aşındırıcının fiyatı, aşındırıcının/kesilecek malzemenin özellikleri ve bunlara bağlı olarak nozülde meydana gelebilecek aşınmalar göz önünde bulundurulmalıdır (Martinec, 1992; Ansari ve Hashish, 1995; İnal, 2011).



Şekil 1.12. Kayaç içerisinde garnet minerali ve öğütülmüş garnet

Garnetler, Bronz Çağından beri değerli taşlar ve aşındırıcılar olarak kullanılan bir grup silikat mineralidir. Tüm garnet türleri benzer fiziksel özelliklere ve kristal formlara sahiptir, ancak kimyasal bileşimde farklılık gösterir. Farklı tür garnetler; pirop, almandin, spessartin, andradit, uvarovit ve grossulardır. ASJ’de aşındırıcı olarak genellikle almandin garnet kullanılır. Garnet türleri her renkte bulunur ve en yaygını kırmızımsı renkte olanlarıdır. Işık geçirgenlik özelliklerine göre şeffaf (genellikle süs taşı olarak kullanılırlar) ve opak (genellikle endüstriyel amaçla aşındırıcı olarak kullanılırlar) olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Mineralin parlaklığı camsı (cam benzeri) veya reçineli (kehribar benzeri) olarak kategorize edilir. Garnetler, $X_3Y_2(SiO_4)$ genel formülüne sahip silikatlardır. X bölgesi genellikle iki değerlikli (Ca, Mg, Fe, Mn), Y bölgesi de üç değerlikli katyonlar (Al, Fe, Cr) tarafından işgal edilir. Garnetlerin bölünme düzlemleri yoktur, bu nedenle yük altında kırıldıklarında keskin ve düzensiz (konkoidal) parçalar oluşur. Garnet mineral grubu Mohs ölçeğinde yaklaşık 6-7,5 arasında sertlik değerleri gösterir. Günümüzde garnetin ana üreticileri ABD, Avustralya ve Hindistan’dır. Dünyanın en büyük garnet madeni New York yakınlarında bulunur ve dünya garnetinin yaklaşık %90’ını sağlayan Barton Mines Corporation tarafından işletilir.

Şirket ayrıca, ilk garnet üretimini 1878’de gerçekleştirerek bu alanda dünyada da ilk olmuştur (Schmetzer ve Bernhardt, 1999; Baxter vd., 2013; Galois, 2013; Perc, 2017).

Alüminyum oksitler, boksitin elektrik ark fırınlarında 1900-2100 °C’de eritilmesiyle elde edilmektedir. Beyaz olanı yüksek saflıktadır, demir içermez. Mohs sertlikleri 9 civarındadır. Olivin ise çoğunlukla Dünit kayalarından elde edilen, Mg ve Fe iyonları içeren doğal bir silikat mineralidir. Diğer bir aşındırıcı olan zımpara tozu da çok sert ve doğal bir kayaç olan zımparanın boyutunun küçültülmesiyle elde edilen doğal bir aşındırıcıdır. Bunun yanında cam, kırılıp elenerek granül ya da küre şeklinde üretilebilir. Ek olarak; çelik bilye, bir eritme prosesinde üretilir, çeliğe yuvarlak şekil verilir. Yoğunluğu, diğer aşındırıcılara göre hayli yüksektir (Hallaçoğlu, 1999; Kaya, 2016; URL-10).

1.5. Literatür Özeti

ASJ ile doğal taş kesimini irdeleyen çalışmalarda; kesme parametrelerinin ve doğal taş özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkisi, kesme veriminin analizi, aşındırıcı boyutunun kesme performansına etkisi, aşındırıcıların tekrar kullanımı ve kesme performansının modellenmesi gibi konular ele alınmıştır. İlgili konularda gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Kesme parametrelerinin kesme performansına etkisi: Karakurt vd. (2011a) ilerleme hızı, su basıncı ve nozül-numune mesafesindeki artışa bağlı olarak kerf açısının arttığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, aşındırıcı besleme miktarındaki değişimlerin kerf açısını belirgin bir şekilde etkilemediğini belirtmişlerdir. İlgili çalışmada, ilerleme hızı ve nozül-numune mesafesi kerf açısını etkileyen başlıca kesme parametreleri olarak tanımlanmıştır. Su basıncı ve ilerleme hızı, Engin (2012) tarafından kesme derinliğini etkileyen en önemli kesme parametreleri olarak tanımlanmıştır. Aydın vd. (2011); ilerleme hızı, su basıncı ve nozül-numune mesafesinin artmasının yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediğini belirlemişlerdir. Çalışmada, su basıncı ve aşındırıcı besleme miktarı yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli kesme parametreleri olarak tanımlanmıştır. Aydın vd. (2012), artan ilerleme hızı ve azalan aşındırıcı boyutuna bağlı olarak kesme derinliğinin düştüğünü belirlemişlerdir. Çalışmada, aşındırıcı besleme miktarı ve su basıncının artmasıyla kesme derinliğinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, nozül-numune mesafesinin kesme derinliği üzerinde belirgin bir değişikliğe yol açmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Kesme hızının doğal taş kesme derinliğini etkileyen en önemli kesme parametresi olduğu Karakurt vd. (2012b)

tarafından belirlenmiştir. Gupta vd. (2013), kerf açısını etkileyen başlıca kesme parametresinin ilerleme hızı olduğunu tespit etmişlerdir. Karakurt vd. (2014), nozül-numune mesafesi ve ilerleme hızını, kesme genişliğini etkileyen başlıca kesme parametreleri olarak tanımlamışlardır. Oh ve Cho (2014), su basıncındaki artışa bağlı olarak kesme derinliği ve hacminin arttığını gözlemiş ve doğal taş kesiminin başlaması için kritik bir basınç değeri (granit için yaklaşık olarak 70-90 MPa) tespit etmişlerdir. Çalışmada, yüksek su basıncı ve düşük ilerleme hızlarında en iyi kesme derinliklerinin elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, maksimin kesme derinliği için optimum bir aşındırıcı besleme miktarı da (%10 hacimsel oran) ilgili çalışma kapsamında tespit edilmiştir. Araştırmacılar, optimum aşındırıcı besleme miktarının aşılmasıyla jet oluşum proseslerinde enerji kaybının (aşındırıcıların çarpışmasından ötürü) meydana geleceğini belirtmişlerdir. Çalışmada, nozül-numune mesafesindeki artışa bağlı olarak kesme derinliğinin azaldığı ve jetteki saçınımların bir sonucu olarak kesme genişliğinin arttığı belirlenmiştir. Młynarczyk vd. (2014) ilerleme hızının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azalacağını ifade etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün kesim yüzeylerinin üst taraflarında düşük ve alt bölgelerinde ise yüksek olduğu Alsoufi (2017) tarafından gözlenmiştir. Çalışmada, artan nozül-numune mesafesinin yüzey pürüzlülüğü/dalgallılığını arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, ilerleme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey kalitesinin düştüğü gözlenmiştir. Hlavac vd. (2017), artan ilerleme hızına bağlı olarak kerf açısının azaldığını belirtmişlerdir. Arab ve Celestino (2017), kesme hızı ve pompa basıncının kesme verimliliği ile ilgili kesme parametreleri üzerindeki etkilerini, farklı kaya türleri için araştırmışlar; en iyi kesme verimini, 200 mm/dk kesme hızı ve 400 MPa pompa basıncı ile elde etmişlerdir. Pompa basıncının artmasıyla hem kaldırılan malzeme hacmi hem de kesme hızının arttığını ve genel olarak kesmenin spesifik enerjisi için tam tersi bir eğilimin olduğunu gözlemişlerdir.

Doğal taş özelliklerinin kesme performansına etkisi: Karakurt vd. (2011a); doğal taşın tek eksenli basma dayanımının, mineral içeriğinin ve mineral boyutlarının kerf açısını etkilediğini belirtmişlerdir. Doğal taşı oluşturan minerallerin tane boyutu ve dizilimlerinin yüzey pürüzlülüğünü etkilediği Aydın vd. (2011) tarafından tespit edilmiştir. Engin (2012); Shore sertliği, Böhme aşınma kaybı ve yoğunluğun kesme derinliğini etkileyen önemli doğal taş özellikleri olduğunu belirtmiştir. Aydın vd. (2012) doğal taş kesme derinliği ile doğal taşın su emme, doğal taşı oluşturan minerallerin maksimum tane boyutları ve ortalama doğal taş tane boyutu arasında anlamlı ilişkiler tespit etmişlerdir. Aydın vd. (2012) iri tane boyutuna sahip doğal taşlarda daha yüksek kesme derinliğinin elde edildiğini ortaya

koymuşlardır. Çalışmada, ince taneli doğal taşların kesme yüzeylerinin daha pürüzlü olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, iri taneli doğal taşlarda daha yüksek kerf açılarının elde edildiği görülmüştür. Karakurt vd. (2014); doğal taşın su emme, birim hacim ağırlık, mikrosertlik ve ortalama tane boyutunun kerf genişliğiyle yakından ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. Oh ve Cho (2014), yüksek kesme derinliklerinin düşük dayanıma sahip doğal taşlarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ASJ ile meydana getirilen erozyonlara karşı bir direnç indeksi olarak tek eksenli basma dayanımının kullanılabileceğini vurgulamışlardır. Arab ve Celestino (2017), kayaçların mineralojik bileşimi ve fiziksel-mekanik davranışlarının, ASJ ile kayaç kesmede oluşan kerf üzerinde önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, mermer ve kumtaşının ASJ ile kesmeye karşı daha düşük ve birbirine benzer bir direnç gösterdiğini ve siyenit ve granitin ise daha yüksek ve birbirine benzer bir direnç sunduğunu gözlemlemişlerdir. Xiao vd. (2021), farklı yapılara sahip kayaçların ASJ etkisi altında hasar ve kırılma özelliklerini analiz etmiş ve yenilme mekanizmalarını ortaya çıkarmışlardır. Araştırmacılar; kömürde katmanlı enine çatlaklar ve yarıklardan oluşan çatlak ağı, kumtaşında iğne şeklinde bir erozyon çukuru ve şeylde yüzey döküntüsü kabarmasıyla katmanlı enine çatlaklardan oluşan T tipi bir çatlak ağı gözlemlemişlerdir. Çalışmada, malzeme uzaklaştırma oranının en fazla kömürde olduğu, onu sırasıyla şeyl ve kumtaşının takip ettiği belirtilmiştir. Ayrıca, jet hızındaki artışın genel olarak erozyon bölgesini ve çatlak sayısını arttırdığını tespit etmişlerdir.

Aşındırıcı boyutunun kesme performansına etkisi: Karakurt vd. (2011a); iri taneli aşındırıcılarla daha düşük kerf açılarının elde edildiğini belirlemişlerdir. İnce boyutlu aşındırıcılarla daha pürüzsüz yüzeylerin elde edildiği Aydın vd. (2011) tarafından ortaya konulmuştur. Aydın vd. (2012), azalan aşındırıcı boyutuna bağlı olarak kesme derinliğinin düştüğünü belirtmişlerdir.

Aşındırıcıların tekrar kullanımı: Aydın (2014), ASJ ile doğal taş kesiminde kullanılan aşındırıcı tanelerin dikkate değer bir miktarının kesim sonrasında tekrar kullanılabilir bir formda olduğunu göstermiştir. Çalışmada mikrosertlik, aşındırıcıların tekrar kullanılabilirliğini etkileyen en önemli doğal taş özelliği olarak belirlenmiştir. Ayrıca, aşındırıcıların tekrar kullanılabilirliklerinin doğal taşın mikrosertliğine, kuvars ve plajiyoklaz içeriğine bağlı olarak yüksek güvenilirlikte tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Aydın (2015), aşındırıcıların tekrar kullanılabilirlik oranlarını ilk, ikinci, üçüncü ve dördüncü kesimler için sırasıyla %82, %58, %34 ve %18 olarak belirlemiştir. Çalışmada, kesme derinliği, kerf genişliği ve yüzey pürüzlülüğünün geri kazanımla birlikte azaldığı

sonucuna ulaşılmıştır. Araştırmacı, kerf açısı ve geri kazanım arasında etkin bir eğilim gözlemlemiştir. Çalışmada, aşındırıcıların tane boyut dağılımının geri kazanılan aşındırıcıların kesme performansının iyileştirilmesinde önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Kesme performansının modellenmesi: Engin (2012), önerdiği modeller ile kesme derinliğinin doğal taş özelliklerine ve kesme parametrelerine bağlı olarak etkili bir şekilde tahmin edilebileceğini belirtmiştir. Kesme parametrelerine bağlı olarak kesme derinliğinin etkili bir şekilde tahmin edilebileceği, Aydın vd. (2012) tarafından ortaya koyulmuştur. Çalışmada ayrıca doğal taş özelliklerinden yoğunluk, tek eksenli basma dayanımı, eğilme dayanımı ve Schmidt sertliğine bağlı olarak da kesme derinliğinin tahmin edilebileceği görülmüştür. Karakurt vd. (2012a), kesme parametrelerine bağlı olarak kerf açısının tahminini sağlayan modeller geliştirmişlerdir. Çalışmada doğal taş özelliklerinden yoğunluk, ultrasonik hız ve mikrosertliğe bağlı olarak geliştirilen modellerle de kerf açısının yüksek doğrulukta tahmin edilebileceği belirtilmiştir. Aydın vd. (2014), kesme performansının modellenmesinde regresyona alternatif bir yöntem olarak yapay sinir ağları tekniğinin başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Chakraborty ve Mikra (2018), ASJ'nin optimal kesme parametreleri kombinasyonlarını bulmak için yeni nesil bir algoritma uygulamışlardır. Çalışmada, çeşitli ASJ kesme parametrelerinin (aşındırıcı ve numunelerin fiziksel ve mekanik bazı özellikleri, su basıncı, ilerleme hızı, nozül açısı, aşındırıcı besleme miktarı ve jet hızı) değişen değerlerine göre farklı tepkilerin varyasyonlarını sergileyen geliştirilmiş dağılım diyagramları oluşturulmuş; bu diyagramların proses mühendislerine ve operatörlere, maksimum kesme verimi elde etmek için ilgili parametreleri en uygun seviyeler olarak ayarlama konusunda yardımcı olacağı belirtilmiştir. Panchal vd., (2021) ise ASJ ile kesmede spesifik enerji tahmini için kapsamlı bir analitik model sunmuşlardır. Model, momentum denge denklemi ve Bernoulli teoremi kullanılarak geliştirilmiştir. Araştırmacılar geliştirdikleri modelle, farklı kesme parametre (aşındırıcı besleme miktarı, su basıncı ve ilerleme hızı) kombinasyonları için spesifik enerjinin belirlenebileceğini belirtmişlerdir.

Farklı aşındırıcıların kullanımı: Agus vd. (1995), konuyla ilgili erken dönem çalışmalarında garnet, silis kumu ve bakır fırın cürufu kullanarak ASJ ile granit ve mermer kesmişlerdir. Çalışmada, granit üzerinde yapılan testler temelinde, garnetin kesme performansı açısından diğer aşındırıcılara göre daha üstün olduğu ve kesilen numune kalınlığı arttıkça performans farkının arttığı tespit edilmiştir. Araştırmacılar, 2 mm kalınlığın

altında ise silis kumunun, düşük maliyeti nedeniyle ekonomik olarak rekabetçi hale geldiğini belirtmişlerdir. Mermer söz konusu olduğunda ise, silis kumunun garnete yakın performans gösterdiği belirtilmiştir. Axinte vd. (2009), elmas aşındırıcılarla süper sert bir malzeme olan polikristalin elması verimli bir şekilde kesebilmişlerdir. Engin vd. (2011) çalışmalarında, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden alınan 5 farklı garnet türünü kullanarak çeşitli malzemelerin (mermer, granit, alüminyum ve çelik) kesimlerini gerçekleştirmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü temelinde kesme performansını değerlendiren araştırmacılar, almandin garnete alternatif olarak diğer garnet türlerinin de aşındırıcı olarak kullanılabileceğini tespit etmişlerdir. Coşansu ve Coğun (2012), garnet, kolemanit tozu ve garnet-kolemanit tozu karışımı (çeşitli oranlarda karışım) ile çeşitli malzemelerin kesimlerini gerçekleştirmişlerdir (mermer, cam, alüminyum alaşımı, titanyum alaşımı ve kompozit). Çalışmada, farklı ilerleme (kesme) hızı ve jet hızı (nozül çıkışındaki ASJ hızı) değerlerinde; kesme performans (yüzey pürüzlülüğü, yüzey dalgalılığı ve kerf açısı) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. İki aşındırıcı için de jet hızının artmasıyla performans değerlerinin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise azaldığını tespit etmişlerdir. Kolemanit tozunun; alüminyum, mermer ve kompozitte başarılı olduğu gözlenmiştir. Kolemanit tozunun garnetle aynı kesme performansını, garnetin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlere göre %40 daha düşük ilerleme hızı ve %100 daha yüksek jet hızı kullandıkları kesimlerde elde etmişlerdir. Kolemanit tozunun düşük sertliği (4-4,5 Mohs), elde edilen performans düşüklüğünün gerekçesi olarak gösterilmiştir. Garnetin yokluğu/yetersizliği durumunda kolemanit tozunun alternatif aşındırıcı olarak değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Cha vd. (2021) ise çalışmalarında ASJ ile granit kesiminde aşındırıcı olarak garnet ve çelik bilye kullanmışlardır. Araştırmacılar, aynı aşındırıcı besleme miktarında, çelik bilyeler ile garnete göre %40-50 daha fazla kesme derinlikleri elde etmişlerdir. Ayrıca, çelik bilyelerin %60 gibi yüksek bir geri dönüşüm oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Geri dönüştürülmüş çelik bilye üzerinde pas gözlemlenmişler ve ideal küresel şekli koruyan çelik bilyelerin, tekrarlanan geri dönüşüm sayısı ile azaldığını bulmuşlardır.

1.6. Tez Çalışmasının Kapsamı ve Amacı

ASJ sahip olduğu çeşitli avantajlarla doğal taşların kesilmesi ve işlenmesinde geleneksel yöntemlere alternatif bir kesme teknolojisi olarak ön plana çıkmaktadır. ASJ ile kesme işlemlerinde genellikle aşındırıcı olarak garnet kullanılmaktadır. Bu durumun temel

sebebi aşındırıcı seçiminde fiyat odaklı değerlendirmelerin yapılmasıdır. Garnet, benzer sertlikteki aşındırıcılara kıyasla daha ucuz bir aşındırıcıdır. Ancak, sadece fiyatının referans alınarak aşındırıcı seçiminin yapılması bilimsel bir yaklaşım olmayacaktır. Aşağıda bu kapsamda yapılacak değerlendirmelerin yol açabileceği çeşitli olumsuzluklar özetlenmeye çalışılmıştır.

- i. Aynı kesme koşullarında farklı bir aşındırıcıyla daha yüksek kesme derinlikleri elde edilebilir. Bu, ASJ'nin aynı derinliğin elde edilmesi için birim enerji tüketiminin azalması anlamına gelecektir. Enerji tüketimin azalmasına bağlı olarak işletme maliyetlerinde kayda değer şekilde bir tasarrufun sağlanması mümkün olacaktır.
- ii. Bilindiği gibi ASJ ile kesilen doğal taş numune yüzeylerinde kerf profili, pürüzlü yüzeyler ve çizikli yapı oluşmaktadır. Doğal taşın kullanım alanına bağlı olarak, bu olumsuzlukların ikincil işlemlerle düzeltilmesi gerekebilmektedir. Daha iyi bir kesim yüzeyi sağlayan alternatif bir aşındırıcıyla ikincil işlemlerin maliyetleri ve bu işlere ayrılacak zaman azaltılabilir.
- iii. ASJ ile kesmede kesme genişliğinin artmasıyla ürün kaybı yaşanmaktadır. Ekonomik olarak değerlendirilebilecek bir kaynak bu şekilde israf edilmektedir. Alternatif aşındırıcılarla daha düşük kesme genişliklerinin elde edilebileceği düşünülmelidir.

ASJ ile çeşitli sektörlerde gerçekleştirilen kesme uygulamalarında, garnete alternatif olarak değerlendirilebilecek birçok aşındırıcı tipi bulunmaktadır. İlgili literatürde, garnet haricindeki aşındırıcıların kesme performanslarına yönelik kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmayla söz konusu boşluğun doldurulması hedeflenmektedir.

Çalışmanın amacı, garnete alternatif olarak kullanılabilecek farklı aşındırıcıların doğal taş kesme performanslarının belirlenmesidir. Bu amaç temelinde hedefler aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- i. Aşındırıcıların ve kayaçların çeşitli özelliklerinin kesme performansı üzerindeki etkilerinin saptanması
- ii. Farklı performans göstergeleri açısından daha iyi performans sunan aşındırıcı tiplerinin belirlenmesi
- iii. Kesme yüzeylerinde gözlenen makro ve mikro ölçekli aşınmaların aşındırıcı tipiyle olan ilişkilerinin gözler önüne serilmesi

Çalışmanın konu ve kapsamı ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- i. Doğal taş özelliklerindeki farklılıkların çeşitli aşındırıcıların kesme performanslarına etkileri: Doğal taş özelliklerinin her bir aşındırıcı çeşidi için kesme genişliği, kesme

derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı, kerf açısı, sapma açısı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin araştırılması

- ii. Aşındırıcı özelliklerinin kesme performansına etkisi: Aşındırıcıların sertlik, yoğunluk ve şekilsel özelliklerinin ASJ'nin kesme performansı üzerindeki etkilerinin irdelenmesi
- iii. Uygun aşındırıcı seçimi: Kesme sonrası istenilen özellikler (yüksek kesme derinliği, düşük pürüzlülük vb.) temelinde hangi tip aşındırıcıların kullanımının daha uygun olacağının araştırılması
- iv. Kesme yüzeylerinde gözlenen aşınmalar: Kesme yüzeylerinde gözlenen aşınmaların makro ve mikro ölçekte irdelenmesi, malzeme özelliklerindeki değişimlerin aşınmalar üzerindeki etkisinin analiz edilmesi ve ilgili aşınmaların aşındırıcı tipiyle olan ilişkisinin araştırılması

Çalışmanın, literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklılığı aşağıda özetlenmektedir:

- i. Farklı kökene sahip doğal taşlarda alternatif aşındırıcıların sergileyeceği performansın irdelenmesi
- ii. Doğal taş özelliklerinin alternatif aşındırıcıların kesme performanslarına etkisinin araştırılması
- iii. Alternatif aşındırıcıların kesme performansını etkileyen başlıca doğal taş özelliklerinin tespit edilmesi
- iv. Aşındırıcıların çeşitli özelliklerinin kesme performansına etkisinin araştırılması
- v. Kesme yüzeylerinde oluşan aşınmaların aşındırıcı/kayaç tipi ve özellikleriyle olan ilişkilerinin irdelenmesi

Sonuç olarak, bu çalışma ile alternatif aşındırıcıların ASJ ile doğal taş kesmede kullanımına yönelik bir farkındalığın oluşturulması beklenmektedir. Alternatif aşındırıcıların sağlayabileceği çeşitli avantajlarla ASJ kesme uygulamalarında üretim verimliliği arttırılabilecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında ASJ ile farklı kökenden 10 çeşit kayacın, 8 farklı aşındırıcı kullanılarak kesimi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda önce aşındırıcı ve kayaçların temini sağlanmış, sonrasında bu kayaçların karakterizasyonuna (fiziko-mekanik, mineralojik ve kimyasal özelliklerin belirlenmesi) yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

2.1. Materyaller

2.1.1. Aşındırıcılar

Endüstride aşındırıcı malzeme olarak satılan ve çalışma kapsamında değerlendirilebilecek olan 8 farklı aşındırıcının temini gerçekleştirilmiştir. Bu aşındırıcılar; garnet, kahverengi alüminyum oksit (AOK), beyaz alüminyum oksit (AOB), zımpara tozu (zımpara), cam küre (cam), olivin, plastik granül (plastik) ve çelik bilyedir (çelik). Takip eden bölümlerde ilgili aşındırıcıların kısaltmaları kullanılacaktır. Olivin ve zımpara sırasıyla Isparta ve İzmir’de, diğer aşındırıcılar ise İstanbul’da faaliyet gösteren firmalardan temin edilmiştir. Aşındırıcılar 25 kg’lık paketler halinde temin edilmiştir (Şekil 2.1). K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında Malvern Mastersizer 2000 cihazıyla yapılan, aşındırıcı tane boyut dağılımı analizleri Tablo 2.1’de sunulmaktadır.



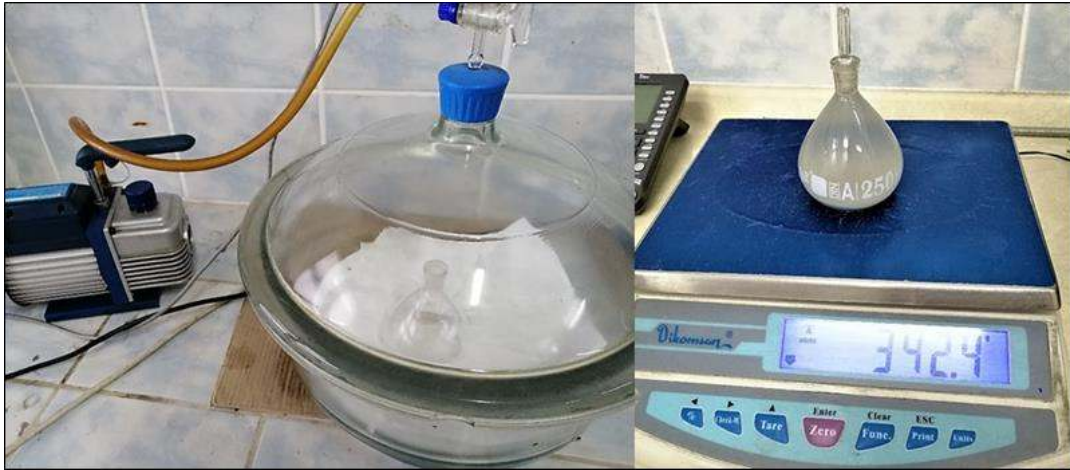
Şekil 2.1. Çalışma kapsamında kullanılan paketlenmiş aşındırıcılar

Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan aşındırıcıların tane boyut dağılımı

Aşındırıcı Adı	*d ₁₀	*d ₂₀	*d ₅₀	*d ₈₀	*d ₉₀
Çelik	241	267	328	401	442
Garnet	218	246	311	392	439
Zımpara	155	174	221	281	316
AOK	180	201	251	311	349
AOB	169	189	234	290	323
Olivin	154	184	263	371	436
Cam	169	189	232	286	318
Plastik	254	294	396	532	613

*d_x: Malzemenin %x'inin altında kaldığı boyut (μm)

Aşındırıcıların kimyasal analizleri (XRF analizi) MTA Analiz Laboratuvarlarında yaptırılırken, Mohs sertlik değerleri literatürden ve ilgili firmalardan elde edilmiştir (Hallaçoğlu, 1999; URL-10). Mineral tane yoğunlukları, K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölüm Laboratuvarlarında, ASTM D854-14 standardında Piknometre deneyi ile belirlenmiştir (Şekil 2.2). Yine aynı laboratuvarında alttan aydınlatmalı polarize mikroskopla aşındırıcılar incelenmiş ve K.T.Ü. Merkez Laboratuvarında taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.2. Piknometre deneyi



Şekil 2.3. Aşındırıcıların SEM incelemeleri

Aşındırıcıların fiziksel özellikleri ve kimyasal içerikleri sırasıyla Tablo 2.2 ve Tablo 2.3'te sunulmaktadır.

Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan aşındırıcı çeşitleri ve bazı özellikleri

Aşındırıcı Adı	Yoğunluk (g/cm ³)	Sertliği (Mohs)	Renk	Tane Şekli
Çelik	6,95	~ 6,5	Metalik gri	Küresel
Garnet	4,03	~ 7,5	Bordo/kahverengi	Köşeli
Zımpara	4,02	~ 8,5	Siyah/kahverengi	Köşeli
AOK	3,97	~ 9,0	Koyu kahverengi	Köşeli
AOB	3,96	~ 9,0	Beyaz	Köşeli
Olivin	3,35	~ 6,5	Açık yeşil/gri	Köşeli
Cam	2,55	~ 6,0	Beyaz/şeffaf	Küresel
Plastik	1,40	~ 3,5	Kirli beyaz	Köşeli

Tablo 2.2'de görüldüğü gibi, plastiğin yoğunluğu ve sertliği diğer aşındırıcılara göre oldukça düşüktür. Çeliğin yoğunluğu, AOK ve AOB'un ise sertlikleri diğerlerine göre yüksektir. Sertlik olarak alüminyum oksitlerin ardından zımpara ve garnet gelmektedir. Olivin ve cam ise yoğunluk ve sertlik olarak aşındırıcılar içerisinde ortalarda yer almaktadır.

Tablo 2.3. Kullanılan aşındırıcıların kimyasal içerikleri (%)

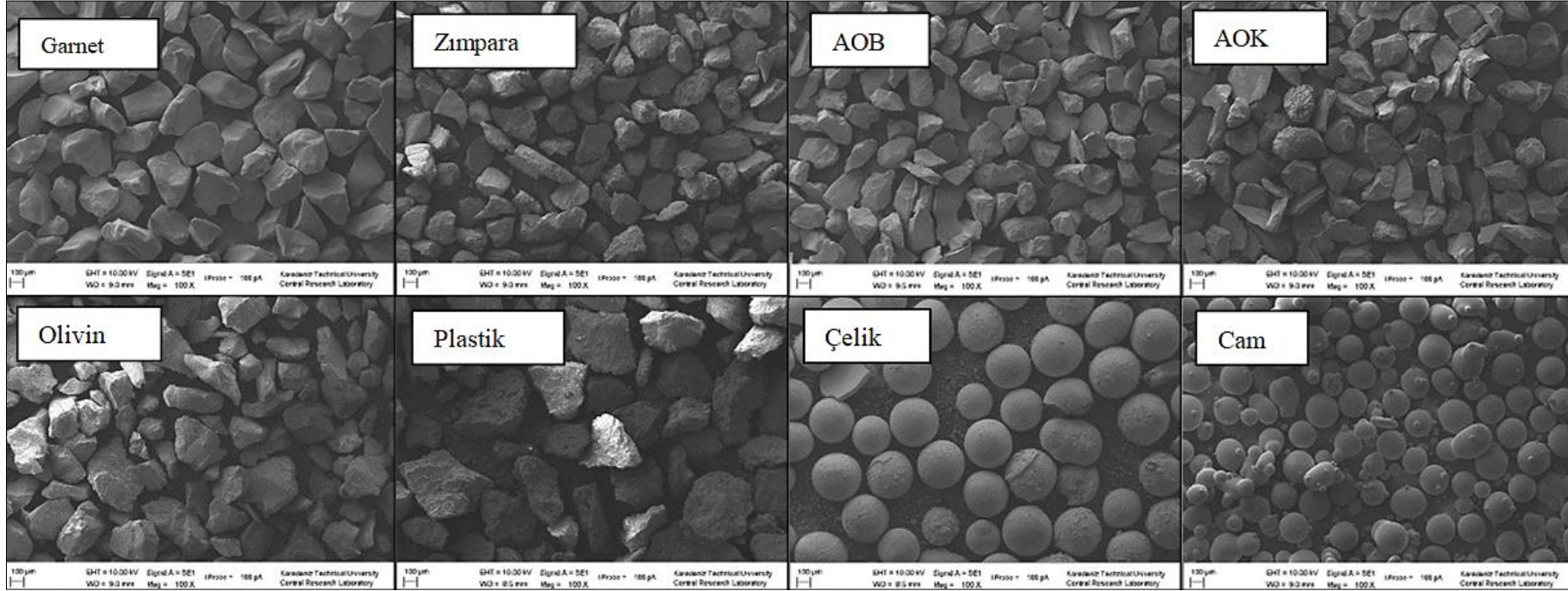
İçerik	Garnet	AOB	AOK	Olivin	Zımpara	Cam	Çelik
Al ₂ O ₃	23,00	99,73	95,65	0,80	62,30	2,50	–
SiO ₂	35,00	0,01	0,92	40,00	8,40	71,50	–
CaO	1,00	0,02	0,32	1,90	1,20	8,85	–
Na ₂ O	–	0,14	–	–	–	11,15	–
MgO	7,00	0,01	0,22	49,00	0,20	5,00	–
Fe ₂ O ₃	33,00	0,03	0,12	7,80	25,60	0,50	–
Diğer	MnO: 1,00	TiO ₂ : 0,02	TiO ₂ : 2,42	MnO: 0,10	-	K ₂ O: 1,50	C: 1,2, Si: 1,5 Fe: 96, Mn:1

* Plastik: Üre, melamin, akrilik

Şekil 2.4'te aşındırıcıların SEM cihazında 100 kat büyütülmüş görüntüleri verilmektedir. Çeliğin ve camın tane şeklinin yuvarlak/küresel, diğer aşındırıcıların ise köşeli oldukları görülmektedir.

2.1.2. Kayaçlar

Trabzon ve Eskişehir'de faaliyet gösteren doğal taş işletmelerinden, 10 farklı kayaca ait bloklar (10x20x40cm) temin edilerek K.T.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarlarına getirilmiştir (Şekil 2.5). Blokların adet ve boyutlarının belirlendiği ön değerlendirmede iki durum göz önünde bulundurulmuştur: ilgili standartlarda kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek için yapılacak deneylerde belirtilen numunelerin ve ASJ ile kesim işlemleri için hazırlanacak plakaların adet ve boyutları. Çalışmada kesim için kullanılacak bu doğal taşlar 3 adet tüf (Bayburt Taşı, Kayseri Tüfü ve Rize İyidere Taşı), 2 adet Sparitik (fosilli) Kireçtaşı (Antalya Limra ve Antalya Susamlı), 2 adet bazaltik kayaç (Trabzon bölgesinden bazalt ve lamprofir), 1 andezit (Ankara Pembe Andezit), 1 adet mermer (Afyon Bulut) ve 1 adet travertendir (Kastamonu).



Şekil 2.4. Aşındırıcıların SEM görüntüleri (100 X)



Şekil 2.5. Bloklar halinde temin edilen doğal taşlar

K.T.Ü. Maden Mühendisliği laboratuvarlarında, kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Kayaçların aşınma dirençlerinin belirlenmesi için EN 14157 (2017) standartlarında Böhme aşınma deneyi yapılmıştır. Ayrıca, ISRM (2007) standartlarında aşağıdaki deneyler gerçekleştirilmiştir:

- Sertlik tayini: Klasik ve dijital Schmidt çekici sertlik değerleri
- Fiziksel özelliklerin belirlenmesi: Yoğunluk, porozite, boşluk oranı, su emme kapasitesi vb.
- Tek eksenli basma dayanımı
- Nokta yük dayanımı
- Endirekt çekme dayanımı (Brazilian Deneyi)
- Ultrasonik dalga hızı

Schmidt sertlik deneyi, direkt olarak temin edilen bloklardan birer örneğe uygulanmıştır. Deney öncesinde doğal taş bloklarının üst yüzeyleri temizlenmiş ve el zımparası ile pürüzsüzleştirilmiştir. Doğal taş blokları sert ve düzgün bir zemine koyulmuş ve su terazisiyle gerekli kontroller gerçekleştirilmiştir. Blokların 10x20 cm olan yüzeyi üzerinde deney gerçekleştirilmiştir. İlgili yüzey üzerinde belirlenen 20 farklı noktaya Schmidt çekici uygulanmış ve geri tepme değerleri okunarak Schmidt sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Schmidt çekici ile sertlik tayini

Deney, L tipi dijital ve klasik iki ayrı Schmidt çekici ile yapılmıştır. Çekiçler kullanılmadan önce kalibrasyon örsleri ile kalibrasyonları kontrol edilmiştir. Yaklaşık 1 kg ağırlığındaki Schmidt çekiçlerinin yüzeye bastırılan çelik ucunun geri sıçramasıyla bir sertlik değeri elde edilmektedir. Dijital çekişte bu değer elektronik ekrandan gösterilmektedir. Schmidt sertlik değerleri, malzemelerin sertliklerini kıyaslamak için bir veri skalası sunmaktadır. Doğal taşların Schmidt sertlik değerleri (Klasik çekiç: R, Dijital çekiç: Q) Tablo 2.4’te sunulmaktadır.

Tablo 2.4. Doğal taşların Schmidt sertlik değerleri

Doğal Taş	Rize Tüf	Bayburt Tüf	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Mermer	Andezit	Traverten	Bazalt	Lamprofir
Q	54,65	59,65	61,70	64,70	70,60	74,30	75,60	76,80	77,90	78,05
R	39,64	45,60	47,05	47,25	55,65	56,75	58,00	57,50	59,45	62,90

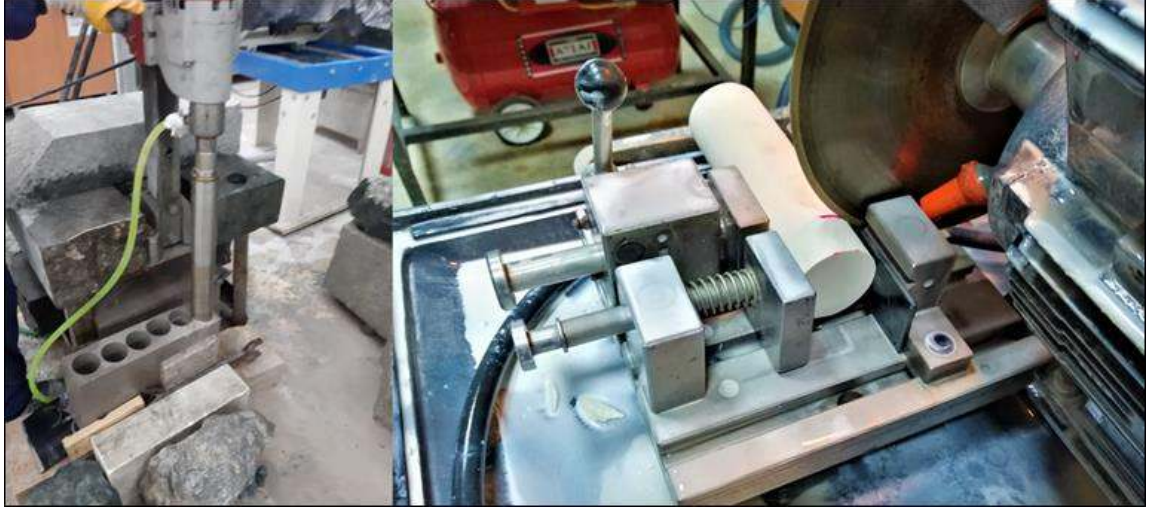
Böhme aşınma deneyi için ise, dairesel testereler kullanılarak bloklardan küp numuneler (7,1 cm kenar ölçülü) hazırlanmıştır. Numuneler etüvde kurutulup desikatörde soğutulduktan sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Deneyde; yatay olarak yerleştirilmiş 75 cm

apında, 30 dev/dk hızla dönen aşındırma diski kullanılmıştır. Her bir numunenin bir yüzü, bu disk üzerine sabitlenerek disk döndürölmüş ve numune yüzeyinin aşındırılması sağlanmıştır. Disk, bir çevrimde 22 tur atmaktadır ve her numuneye bu şekilde 16 çevrim uygulanmıştır. Her çevrimde disk üzerine 20 gr zımpara tozu (numuneyi aşındıran ajan) serpilmiştir. (Şekil 2.7). Deney sonundaki hacim kaybı, Böhme aşınma kaybı olarak (ΔV) kaydedilmiştir.



Şekil 2.7. Küp numuneler ve Böhme aşınma deneyi

Diğer deneyler için ihtiyaç duyulan numuneler karot alma makinesi kullanılarak elde edilmiştir. Elektrik motorlu makineye (sabit tip, 600 dev/dk hızla çalışan ve sulu kesim yapan) 50 cm uzunluğunda ve NX çapında (54,7 mm) karotiyer (soğuk çekme çelikten yapılmış) takılarak bloklardan silindirik karot numuneler alınmıştır (Şekil 2.8). İhtiyaç duyulan disk numunelerin alınması ve karot uçlarının düzeltilmesinde ise dairesel karot kesme testeresi kullanılmıştır (Şekil 2.8). Yüzeyleri zımparalanıp düzeltilen karot ve disk numuneler, oda sıcaklığında 2 hafta süreyle bekletilerek deneyler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. Karot alma işlemi ve karot kesme testeresiyle disk numune hazırlama



Şekil 2.9. Kayaçlardan hazırlanan karot ve disk numuneler

Doğal taşların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için her bir doğal türünden üçer adet disk numune kullanılmıştır. Caliper tekniğiyle, ilgili standart çerçevesinde deney (Su içeriği, porozite, yoğunluk, su emme ve ilgili özelliklerin belirlenmesi; ISRM, 2007) gerçekleştirilmiştir. Öncelikle 0,01 mm hassasiyetli dijital kumpas yardımıyla boyutları belirlenen numuneler 0,01 gr hassasiyetli dijital terazi ile tartılarak doğal yoğunlukları bulunmuştur. Daha sonra 105 derece etüvde 24 saat kurutulup desikatörde soğutulduktan sonra tartılmışlardır. Son olarak da 20 derece su içerisinde 24 saat bekletildikten sonra yine

tartım yapılmıştır. Böylelikle kuru ve doymun yoğunlukları bulunarak ilgili standarttaki hesaplamalar aracılığıyla diğer fiziksel özellikleri elde edilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Doğal taşların fiziksel özelliklerinin belirlenmesi

Tek Eksenli Basma Dayanımı için boy/çap oranları 2,5-3,0 arasında olacak şekilde her doğal taş türü için 5 adet karot numune hazırlanmıştır. Bunun yanında, Endirekt Çekme Dayanımı (Brazilian) ve Nokta Yük Dayanımı için boy/çap oranları 0,5 olan onar adet disk numune hazırlanmıştır. Numuneler NX çaplıdır (54,7 mm). Ayrıca her doğal taş türü için 1 adet karot numuneye ultrasonik hız deneyi uygulanarak p-dalgası geçiş hızı belirlenmiştir (Şekil 2.11). Dayanım deneyleri sonucu kırılan numunelere ait görüntüler şekil 2.12’de sunulmaktadır. Doğal taşların deneyler sonucunda belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 2.5 ve 2.6’da sunulmaktadır.



Şekil 2.11. Karot ve disk kayaç numuneleri kullanılarak yapılan deneyler



Şekil 2.12. Dayanım deneyleri sonrası kırılmış numuneler

Tablo 2.5. Doğal taşların bazı fiziksel özellikleri

Doğal Taş	Ağırlıkça su emme kapasitesi (%)	Efektif su emme (%)	Doğal su içeriği (%)	Doyma derecesi (%)	Tabii yoğunluk (gr/cm ³)	Mineral tane yoğunluğu (gr/cm ³)	Efektif porozite (%)	Boşluk oranı (%)
Bayburt Tüf	12,71	7,14	4,67	36,74	1,73	2,09	20,97	26,53
Kayseri Tüf	7,61	6,61	0,50	6,55	1,99	2,33	15,05	17,73
Rize Tüf	6,60	2,97	3,44	52,12	2,13	2,39	13,61	15,76
Andezit	3,64	1,93	1,64	45,10	2,26	2,42	8,09	8,80
Limra-2	4,31	4,07	0,07	1,47	2,30	2,55	9,90	11,00
Limra-1	3,22	2,93	0,19	5,91	2,32	2,50	7,45	8,05
Traverten	0,95	0,53	0,42	49,26	2,44	2,49	2,30	2,36
Bazalt	2,06	1,22	0,81	39,36	2,53	2,65	5,17	5,45
Lamprofir	2,30	0,94	1,33	58,52	2,54	2,66	5,75	6,12
Mermer	0,11	0,05	0,06	50,00	2,64	2,64	0,29	0,29

Tablo 2.6. Doğal taşların bazı mekanik ve diğer özellikleri

Doğal Taş	Tek Eksenli basma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Kohezyon (MPa)	İçsel sürtünme açısı (°)	Böhme aşınma kaybı cm ³ /50 cm ²	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
Bayburt Tüf	41,85	4,58	2,54	16,65	64,00	26,15	2677
Limra-1	48,93	4,57	3,19	13,67	26,80	24,57	4291
Limra-2	52,39	6,59	3,50	21,86	69,20	25,30	4379
Rize Tüf	52,60	5,85	3,49	18,11	48,00	28,06	3500
Kayseri Tüf	56,24	3,85	3,71	14,06	16,00	24,05	2360
Mermer	65,49	7,07	4,47	22,31	46,80	14,24	5825
Andezit	67,81	5,29	4,49	12,54	13,20	13,92	3504
Traverten	70,09	7,28	5,45	20,65	32,00	15,20	5166
Bazalt	93,71	9,77	7,84	27,09	30,00	9,72	4322
Lamprofir	106,69	9,58	7,66	44,48	69,20	9,15	4971

Tablo 2.7-2.10’da sırasıyla; XRF analizleri, renk-doku ve tane büyüklükleri, mineralojik bileşimleri ve bu bileşimlere yönelik açıklamalar verilmiştir.

Tablo 2.7. Kayaçların kimyasal içeriği (%) (XRF analizi)

İçerik	Limra-1	Limra-2	Traverten	Mermer	Bayburt Tüf	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Lamprofir	Bazalt	Andezit
K.K.	43,15	43,00	41,55	43,25	7,45	0,40	8,75	7,50	6,55	0,80
SiO ₂	0,2	0,3	3,2	0,4	70,1	71,1	42,2	38,7	52,8	64,4
Al ₂ O ₃	<0,1	0,1	1,1	0,2	12,3	14,0	16,9	14,0	15,0	16,5
Fe ₂ O ₃	<0,1	<0,1	0,5	0,1	1,2	2,6	10,5	9,7	8,5	4,7
CaO	55,4	55,6	52,3	55,0	3,1	1,3	3,3	16,0	5,5	4,6
MgO	0,3	0,3	0,8	0,4	0,8	0,5	8,5	4,6	3,2	0,9
Na ₂ O	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,6	4,1	3,5	3,6	1,7	3,7
K ₂ O	<0,1	<0,1	0,1	0,1	3,8	4,8	4,0	2,6	4,9	3,0
P ₂ O ₅	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,3	1,3	0,3	0,3
MnO	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
TiO ₂	<0,1	<0,1	0,1	0,1	0,2	0,5	0,9	1,1	1,0	0,7

*K.K.: Kızdırma Kaybı

Tablo 2.8. Kayaçların renk, doku ve tane büyüklükleri

Kayaç	Renk	Doku (Makro)	Tane Büyüklüğü	Doku (Mikro)
Limra-1	Sarımsı gri	Masif	İnce	Kırıntılı
Limra-2	Sarımsı gri	Masif	İnce	Kırıntılı
Traverten	Grimsi turuncu	Masif, boşluklu	İnce	Kırıntılı
Mermer	Gri	Masif	İnce	Kataklastik
Bayburt Tüf	Sarımsı gri	Taneli	İnce-Orta	Kırıntılı
Kayseri Tüf	Esmer kırmızı	Taneli	İnce-Orta	Kırıntılı
Rize Tüf	Orta Kahve	Taneli	İnce-Orta	Kırıntılı
Lamprofir	Yeşil gri	Porfirik	İnce-Orta	Porfirik
Bazalt	Yeşil gri	Masif	İnce	Porfirik
Andezit	Pembe gri	Porfirik	İnce-Orta	Porfirik

Tablo 2.9. Kayaçların mineralojik bileşimleri

Kayaç	Bileşenler
Limra-1	Kalsit (küçük, orta taneli, allotriyomorf), fosil kavkıları (küçük-orta-iri taneli), Bağlayıcı: Sparit çimento
Limra-2	Kalsit (küçük taneli, allotriyomorf), fosil kavkıları (küçük taneli), Bağlayıcı: Sparit çimento
Traverten	Karbonat grubu mineraller (ince-orta taneli, allotriyomorf)
Mermer	Kalsit (küçük-orta taneli, hipidiyomorf, allotriyomorf)
Bayburt Tüf	Yoğun volkan camı kıymıkları/parçaları (küçük-orta tane boyutlarında), az oranda pomza parçaları, mineral parçaları (plajiyoklaz, sanidin, biyotit), matriks (camsı malzeme)
Kayseri Tüf	Yoğun volkan camı kıymıkları/parçaları (düşük-orta taneli), mineral parçaları (plajiyoklaz, sanidin, piroksen, opak), çok az oranda kayaç (damar) parçaları
Rize Tüf	Kayaç (tüf, volkanik) parçaları (küçük-orta taneli), volkan camı (pomza, az oranda volkan camı kıymıkları) parçaları, az oranda mineral parçalar (feldspat grubu mineraller, piroksen mineraller)
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
Bazalt	Ana bileşenler: Karbonatlaşmış mineral psödömorfu (orta-iri taneli, homojen dağılımlı), kloritleşmiş mineral psödömorfu (orta-iri taneli, homojen dağılımlı), kuvars (İnce taneli, homojen dağılımlı) Tali bileşenler: Opak mineral (ince-orta taneli, homojen dağılımlı), Hamur: Mikrolitik, Süreksizlikler: Ucu açık, kılcal karbonat damarları, demir infiltre olmuş çatlaklar
Andezit	Ana bileşenler: Plajiyoklaz (orta-iri taneli, homojen dağılımlı), biyotit (orta-iri taneli, homojen dağılımlı), amfibol (orta taneli, homojen dağılımlı) Tali bileşenler: Opak mineral (ince-orta taneli, homojen dağılımlı), Hamur: Volkan camı ve kristalit

Tablo 2.10. Kayaçların mineralojik bileşimlerine yönelik açıklamalar

Kayaç	Bileşenler
Limra-1	Örnekte sparitik bağlayıcı içerisinde karbonat taneleri (kalsit) ve fosil kavkıları bulunmaktadır. Fosil kavkıları küçük, orta, iri taneli, karbonat dolguludur. Kalsit mineralleri ise küçük ve orta taneli olarak izlenmiştir. İrili ufaklı, sınırları düzensiz gelişmiş erime boşlukları ince kesitin tamamında bulunmaktadır. Örnek, fosil oranı ve bağlayıcısı dikkate alınarak biyosparit (fosili kireçtaşı) olarak adlandırılır.
Limra-2	Örnek ince taneli olup, kalsit mineralleri ve fosil kavkıları sparitik bağlayıcı ile tutturulmuştur. Sınırları düzensiz gelişmiş erime boşlukları ince kesitin tamamında bulunmaktadır. Örnek, fosil oranı ve bağlayıcısı dikkate alınarak biyosparit (fosilli kireçtaşı) olarak adlandırılır.
Traverten	Örnek, karbonat minerallerinden oluşmaktadır. Bazı kısımlarda radyal gelişmiş kalsit kristalleri ve etrafında demir boyamaları izlenmiştir. Kıvrımlar şeklinde gelişmiş bantlaşmalar mevcuttur. Sınırları düzensiz irili, ufaklı boşluklar bulunmaktadır. Boşlukların çoğunluğunun içi boş, bir kısmı da ikincil kalsit ile dolguludur. Örnek, mineralojik bileşim ve dokusal özellikleri ile traverten olarak tanımlanmıştır.
Mermer	Örnek tamamıyla kalsit minerallerinden oluşmaktadır. Kayacın genel dokusu kataklastiktir. Kalsit minerallerinin kenarlarından itibaren parçalanıp ufalandığı, polisentetik ikiz lamellerinde eğilme, bükülme ve ötelenmeler olduğu görülmektedir. Örnek mermer olarak tanımlanır.
Bayburt Tüf	Matriks kısmında yer yer yaygın kıvılcımsı kahve renkli opak boyamalar izlenmektedir. Gerek volkan camı parçalarında gerek minerallerde yer yer belirgin bir yönlenme izlenmektedir. Örnek kristalik-vitrik tüf olarak tanımlanır.
Kayseri Tüf	Piroksen mineral parçalarının kenarları boyunca değişen oranlarda opaklaşma izlenmektedir. Matriks kısmında yaygın (genelde opak ve piroksen mineral parçalarının etraflarında) değişen oranlarda kıvılcımsı kahve renkli opak boyamalar izlenmektedir. Damar kaya parçaları; plajiyoklaz minerallerinden oluşmuş hamur içinde plajiyoklaz ve piroksen fenokristallerinin izlendiği olası gabroik bileşimli damar kayaç parçalarından oluşmaktadır. Gerek volkan camı parçalarında gerek minerallerde belirgin bir yönlenme izlenmektedir. Örnek kristalik-vitrik tüf olarak tanımlanır.
Rize Tüf	Tüf parçaları: devitrifiye olmuş, yaygın sefrolitik dokunun izlendiği matrikste feldspat mineral parçalarından oluşmakta, sadece matriksten oluşmuş parçalarda izlenmekte, parçaların bazılarında farklı boyutlarda klorit dolgulu gaz boşlukları görülmektedir. Volkanik kayaç parçaları; yoğun olarak olası killeşmiş, kloritleşmiş, plajiyoklaz mikrolitlerinin (hafif yönlenmeli) izlendiği ve bazılarının hamur kısmında yoğun ikincil minerallerce dolgulu (olası klorit, silis boşlukların izlendiği) hamur içinde bazılarında plajiyoklaz fenokristalleri (yaygın değişen oranlarda killeşmiş, serizitleşmiş, karbonatlaşmış), tamamıyla değişen oranlarda karbonat, opak minerallere dönüşmüş olası mafik mineral psödomorfları ve bazılarında kuvars minerallerinin izlendiği parçalardır. Feldspat grubu mineral parçaları; farklı oranlarda karbonatlaşmıştır. Örnek kristalik-vitrik tüf olarak tanımlanır.

Tablo 2.10'un devamı

Kayaç	Bileşenler
Lamprofir	Kayaç alterasyon nedeniyle ilksel mineralojisini kaybetmiştir. Hamurda yoğun analsimleşme izlenmektedir. Yapılan XRD analizinin sonucuna göre kayaç: 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. Kayacın gerek dokusu gerekse mineral çeşitliği nedeniyle lamprofir olabileceği düşünülmektedir.
Bazalt	Kayaç yoğun alterasyon nedeniyle ilksel doku ve mineralojisini kaybetmiştir. Yoğun karbonatlaşma ve kloritleşme izlenen kayaçta hamurda bulunan kuvarsların da ikincil olabileceği, numunenin de ortaç/bazik bileşimli bir volkanik kayaç olduğu düşünülmektedir.
Andezit	Kayaçta bulunan plajiyoklazlar zonlanma göstermekte olup bir kısmında elek dokusu izlenmektedir. Mafik mineraller kenarlarından ve ortalarından itibaren opasitleşme gözlenmektedir. Örnek, andezit olarak tanımlanır.

2.2. ASJ Deney Düzeneği ve Kesim Metotları

K.T.Ü. Maden Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan dairesel testereli taş kesme makinesi kullanılarak, temin edilen doğal taş bloklardan ASJ ile kesme deneylerinde kullanılacak numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.13). Hazırlanan numuneler 5x15x20 cm boyutlarındadır (Şekil 2.14 ve 2.15). Her bir doğal taş çeşidi için 8 adet (toplamda 80 adet) kesme numunesine ihtiyaç duyulmasına rağmen taşıma ve kesme esnasında yaşanabilecek aksaklıklar (kırılma vb.) göz önünde bulundurularak fazladan numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2.13. Dairesel testere ile kayaç blok kesimi



Şekil 2.14. ASJ ile kesime tabi tutulacak numuneler



Şekil 2.15. ASJ ile kesilecek doğal taş plaka numunelerin yüzey görünümleri

Hazırlanan numuneler, İstanbul'da faaliyet gösteren bir firmada ASJ ile kesim işlemlerine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda, üç ekseninde hareket edebilen bir kesme kafasına sahip ASJ kullanılmıştır. İş planı, bir kontrol odasından bilgisayar yardımıyla yapılmış ve kesimler kontrol paneliyle takip edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan ASJ'nin teknik özellikleri Tablo 2.11'de sunulmaktadır. Deney düzeneğinin görünümü ise Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Tablo 2.12'de ise, deneylerde kullanılan suyun analizi yer almaktadır.

Tablo 2.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan ASJ makinesine ait özellikler

Özellik	Değer/Tip
Makine Tipi	S-HP, boşluksuz vidalı tip
Enerji tüketimi (kWh)	40
Maksimum pompa basıncı (MPa)	400
Aşındırıcı tüketimi (gr/dk)	100-400
Maksimum su debisi (l/dk)	3,8
Maksimum kesme hızı (mm/dk)	12000
Nozül çapı-uzunluğu (mm)	1,1-75
Orifis çapı (mm)	0,33
Nozül malzemesi	Tungsten Karbür
Orifis malzemesi	Safir



Şekil 2.16. Çalışmada kullanılan ASJ deney düzeneği

Tablo 2.12. ASJ için önerilen ve çalışmada kullanılan suyun değerleri (Tikhomirov vd., 1992; Ergür, 2007; Kaya, 2016; URL-11, 2022)

Özellik	Önerilen Değer	Çalışmada kullanılan suyun değeri
Toplam çözünmüş katılar (mg/lt)	<500	2,75
Sertlik (mg/lt)	<25	19
Florür (mg/lt)	<250	0,09
Demir (mg/lt)	<250	20
Manganez (mg/lt)	<0,20	0,01
Klor (mg/lt)	<0,10	0,03
Bulanıklık (NTU)	<5	0,15
pH	6,5-8,5	7,26

Kesilecek doğal taş numuneler, ASJ nozülünün altına, 5 ve 20 cm kenarlı yüzeyi üzerine (yüksekliği 15 cm olacak şekilde) dik olarak yerleştirilmiştir. Numuneler uzunlukları boyunca kesilmiştir (20 cm). Toplamda 80 numune (8 çeşit aşındırıcı x 10 çeşit numune) üzerinde kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın hedefi doğrultusunda, tüm makine ve kesim parametrelerinin sabit tutulması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen ön deneyler ve literatür ışığında (Miranda vd., 1993; Huang vd., 2006; Hlavac vd., 2009; Oh ve Chao, 2014; Kaya, 2016; Aydın vd., 2017; Arab ve Celestino, 2017; Aydın vd., 2019; Panchal ve Shaikh, 2021), kesme parametrelerinin hangi değerlerinde kesimlerin yapılacağı belirlenmiştir (Tablo 2.13).

Tablo 2.13. Kesme parametreleri ve değerleri

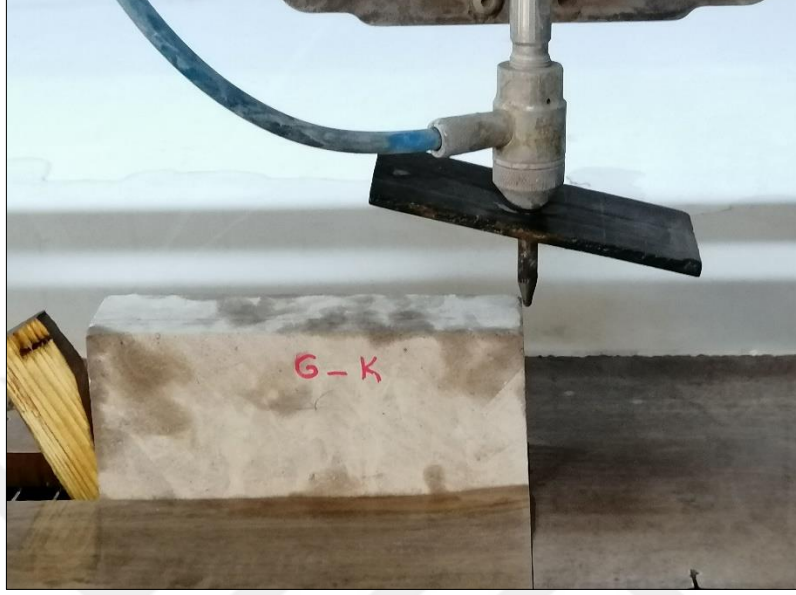
Parametre	Değer
Kesme hızı (mm/dk)	300
Aşındırıcı besleme miktarı (gr/dk)	400
Nozül-numune mesafesi (mm)	4
Çalışma (Pompa) basıncı (MPa)	380
Aşındırıcı boyutu (μm)	200-400
Su tüketimi (l/dk)	3,8

Jetteki aşındırıcı oranı, ağırlıkça %9,52'dir. Eşitlik (1.1) ve (1.2) kullanılarak sırasıyla, jetin nozül çıkışındaki hızı 741 m/sn ve kinetik enerjisi 4228 J olarak hesaplanmıştır. Hız hesabında, verim katsayısı (η), Himmelreich (1992) tarafından önerilen 0,85 değerinde alınmıştır.

Kesim öncesinde, kesmenin gerçekleştirileceği kesme parametreleri seviyeleri, hazırlanan doğal taş numunelerinin boyutları ve kesimin nasıl gerçekleştirileceğine yönelik plan bilgisayar programları aracılığıyla sisteme tanıtılmıştır. Programlama aşamasından sonra kesilecek ilk kayaç numunesi, nozülün altına yerleştirilmiş ve sabitlenmesi sağlanmıştır (Şekil 2.17). İlk olarak makinenin aşındırıcı haznesine kullanılacak ilk aşındırıcı doldurularak, kontrol panelinden kesme işlemi başlatılmıştır.

Kesimler esnasında kesme kafası dik konumda kullanılmıştır (90°). Her numuneye tek bir çizgide tek gidişli kesim yapılmıştır. Aynı aşındırıcı kullanılarak bir kayaç numunesinde kesim bittiğinde makine durdurulup numune alınmış ve bir sonraki kesim için aynı kayaçtan yeni numune yerleştirilmiştir. 10 kayaç numunesi aynı aşındırıcıyla kesildikten sonra, aşındırıcı haznesi boşaltılmış ve yeni aşındırıcıyla doldurulmuştur (Şekil 2.18). Yeni

doldurulan aşındırıcıyla da 10 kayaç numunesi kesilmiştir. Bu şekilde her bir aşındırıcıyla 10 farklı numune üzerinde kesimler gerçekleştirilmiştir (toplam 80 kesim).



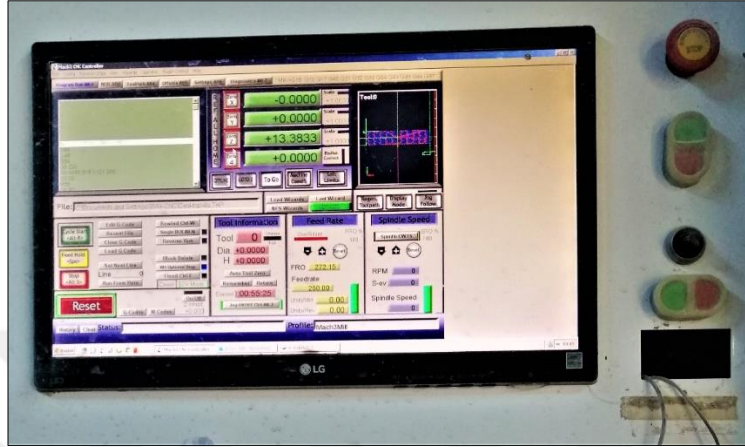
Şekil 2.17. ASJ kesme kafası ve kesilecek bir kayaç numunesi



Şekil 2.18. Aşındırıcının hazneye beslenmesi

Kesim esnasında makinenin kontrolü, kontrol panelinden bir operatör vasıtasıyla sağlanmaktadır. Kesim takip edilerek herhangi bir aksaklık anında makinenin durdurulması

ve aksaklık giderildikten sonra yeniden devreye alınması bu panel sayesinde sağlanmaktadır (Şekil 2.19). Sistem bileşenleri, numunenin ilk kesimini takiben otomatik olarak kendini ayarlayıp ikinci kesim için konum almaktadır.



Şekil 2.19. ASJ kontrol paneli

Kesimler tamamlandıktan sonra doğal taş numuneler (80 adet) paketlenmiş ve farklı aşındırıcıların kesim performanslarının irdelenmesi adına K.T.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarı'na getirilmiştir. Kesilen bir plaka numune Şekil 2.20'de görülmektedir.



Şekil 2.20. Kesilen bir numunenin yan ve üstten görünümü

2.3. Kesme Performans Ölçümleri

Kesilen kayaç numuneleri üzerinde çeşitli ölçümler alınmıştır. Malzeme uzaklaştırma oranı (V_m), kesme genişliği (W), kesme derinliği (h_t), kesme-aşınma derinliği (h_a), çakılma bölgesi genişliği (w_c), çakılma bölgesi derinliği (h_c), kerf açısı (Θ), sapma açısı (β) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_q , R_z) değerlerinin ölçümlerindeki prosedürler aşağıda detaylandırılmıştır.

Öncelikle, kesme işleminden sonra K.T.Ü. Maden Mühendisliği bölüm laboratuvarlarına getirilen kayaçlar oda sıcaklığında 2 hafta bekletilerek, kesim öncesindeki doğal su içeriğine ulaşması sağlanmıştır. Daha sonra kesim yarıklarına kompresörle hava üflenerek serbest aşındırıcı ve/veya kayaç kırıntı/tozlarının uzaklaşması sağlanmıştır. Kesim öncesinde ve sonrasında numuneler hassas teraziyle tartılmış ve ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Bulunan bu ağırlık kayıpları kayaçların doğal yoğunluklarına bölünerek hacim kaybı (uzaklaşan malzeme miktarı, cm^3) bulunmuştur. İlerleme hızı ve kesme hattı boyunca katedilen mesafeden yola çıkarak her bir numunenin kesilme süresi 40 sn olarak hesaplanmıştır. Uzaklaşan malzeme miktarının kesilme süresine bölünmesiyle de birim zamanda uzaklaşan malzeme miktarı (malzeme uzaklaştırma oranı) tespit edilmiştir.

Kesilen her numune üzerinde (80 adet), kesme hattı boyunca kumpas yardımıyla 2 cm aralıklarla hassas bir şekilde kesme genişliği ölçülmüştür (Şekil 2.21). Her numune için 9 ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları hesaplanarak her numune için kesme genişliği değeri elde edilmiştir.

Her bir kayaç numunesinde gerçekleştirilen kesimlerden, kesimin başladığı (giriş) ve bittiği taraftaki (çıkış) yarıktan kerf açıları hesaplanmıştır. Kerf açılarının hesaplanması için yarığın üst kısmındaki kesme genişliği olan üst yarık genişliği ($W_{üst}$), deformasyon aşınmasının başladığı yerdeki genişlik olan alt yarık genişliği (W_{alt}) ve son olarak da yarığın üst noktasından kesme-aşınma bölgesinin bitimine kadar olan dik mesafe (h) kumpasla ölçülmüştür (Şekil 2.22). İlgili değerler kullanılarak kerf açısı (Eşitlik 1.3) hesaplanmıştır.

Kerf, kesimin üst yüzeyinden belli bir derinliğe kadar düzgün bir geometri (genelde V şeklinde, daralan) sunmaktadır. Ancak, artan derinlikle beraber jetin geri yansması ve türbülansın bir sonucu olarak düzensiz bir form kazanmaktadır. Düzensiz kerf formunun gözlemlendiği bölge çakılma bölgesi olarak isimlendirilmektedir. Her bir numune için, kumpas kullanılarak çakılma bölgelerinin (giriş ve çıkışta) genişlikleri ve derinlikleri (en geniş/derin bölgeler için) ölçülmüştür (Şekil 2.21).



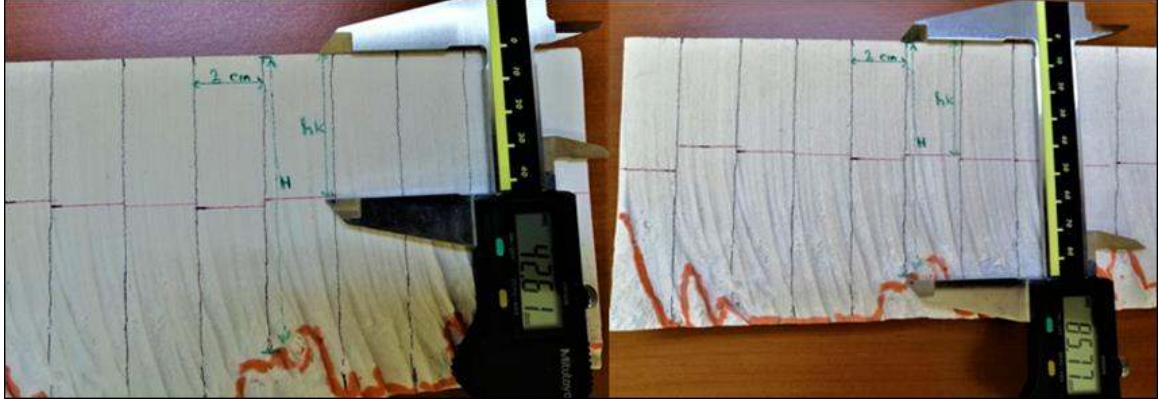
Şekil 2.21. Kesme genişliği, kerf açısı ve çakılma bölgesi verilerinin ölçümü

Kayaç numuneleri üzerinde, elde edilen kesme derinlikleri ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için kesme hattının net bir şekilde görülmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla kayaç numuneleri kesildikleri hatlar boyunca 2 parçaya ayrılmıştır. Yüzeylerin zarar görmesini önleyecek şekilde her kesiğe mukavva parçalar yerleştirilmiş ve hafif bir darbeye önemli bir bölümü kesilmiş olan numunelerin çoğunun rahatça ayrılması sağlanmıştır. Bu yöntemle ayrılması mümkün olmayan numuneler (düşük kesme derinliği olanlar), K.T.Ü. Maden Mühendisliği Laboratuvarlarında ters çevrilerek dikey dairesel testere kullanılarak ASJ kesme hattı boyunca kesilmişlerdir. Kesim hatlarının çakışmamasına özen gösterilmiş ve elde edilen kesme derinliklerine bağlı olarak her iki kesim arasında emniyetli bir mesafe bırakılmıştır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. ASJ ile kesilmiş kayaç numunelerinin iç yüzeylerinin dairesel testere ile açılması

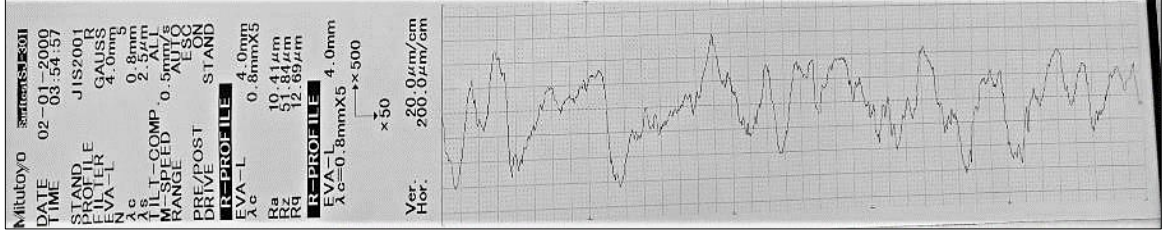
Kesim eksenini boyunca ayrılmış bir kayaç numunesi Şekil 2.22’de görülmektedir. Ayrılmış her bir parça sıra ve yönleri karıştırılmadan numaralandırılarak ölçümler için hazırlanmıştır. Yüzeyden kesimin en alt noktasına kadar olan dikey mesafeyi ifade eden kesme derinliği, kesme hattı boyunca 2 cm aralıklarla kumpas kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmüştür. Her bir kayaç numunesi için 9 ölçüm alınmış ve bu değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak kesme derinliği elde edilmiştir (Şekil 2.23), (Ek Tablo 1). Kesme derinliği ile aynı hat üzerinde, numunenin yüzeyinden deformasyon-aşınma bölgesi üst sınırına kadar olan kesme-aşınma bölgesi derinliği de benzer prosedürle ölçülmüştür. (Şekil 2.23), (Ek Tablo 2).



Şekil 2.23. Kesme derinliklerinin ölçümü

Her bir aşındırıcı için doğal taş kesim yüzeylerinde meydana gelen aşınmalar makro ve mikro ölçekte de incelenmiştir. DIN EN ISO (2010) standardında, kesim yüzeylerinde pürüzlülük ölçümleri için, Mutitoyo Surf test SJ-301 pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda, bir gövdeye bağlı aparatın 2 μm yarıçaplı iğne uçlu probu, yüzeyde 1 cm uzunluğundaki bir çizgiyi 1 mm/s hızla tarayarak, gövdedeki dijital ekranda yüzeyin mikro pürüzlülük profilinin grafiğini çizmekte ve sayısal olarak pürüzlülük değerlerini göstermektedir. Ayrıca, yüzeyin profil grafiği ve diğer veriler cihazın rulo kâğıt haznesinden fiziki olarak da yazdırılabilmektedir (Şekil 2.24). Cihazın dijital ekranında ayrıca, su terazisi gibi bir bilgi sağlayan, ölçüm yüzeyiyle ölçme aparatının düzlüğünü gösteren hareketli bir şekil bulunmaktadır. Cihaz, 0,01 μm duyarlılıkla ölçüm yapmaktadır. R_a ve R_q değerleri için maksimum 100 μm , R_z değeri için ise 350 μm değerine kadar pürüzlü yüzeyleri ölçmektedir. Tüm doğal taş numunelerinde, kesme-aşınma bölgesinde 2 cm aralıklarla belirli bir yatay hat boyunca pürüzlülük ölçümleri alınmıştır (Şekil 2.25). Her bir numune üzerinde

9 adet pürüzlülük ölçümü yapılmıştır (Ek Tablo 3). Elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması hesaplanarak ilgili kesim yüzeyi için pürüzlülük (R_a , R_q ve R_z) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2.24. Bir ölçümden elde edilen yüzey profili grafiği ve pürüzlülük değerleri örneği

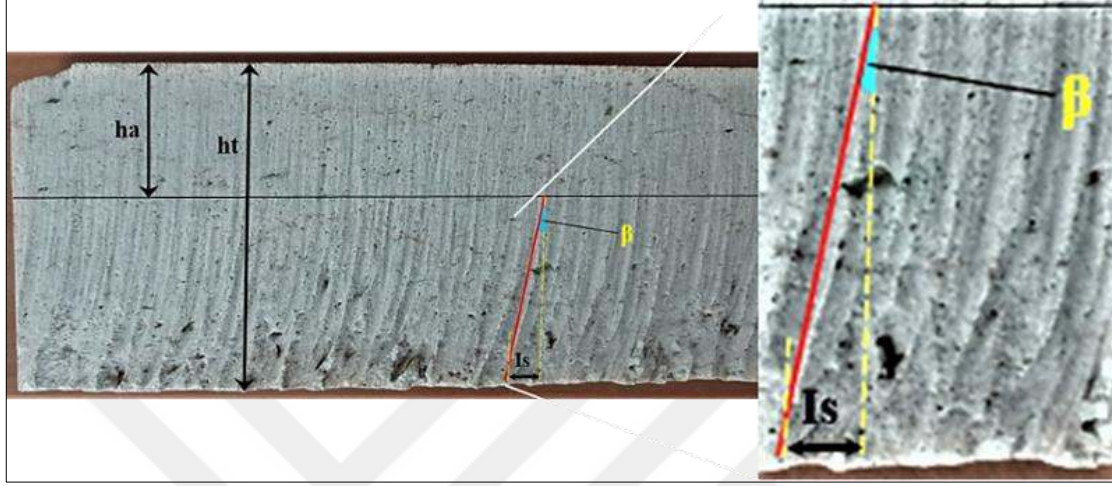


Şekil 2.25. Pürüzlülük cihazı ve kesim yüzeylerinde pürüzlülük ölçümü

Yüzey kalitesi için değerlendirilen bir diğer ölçüt de çizik sapma açısıdır. Çizik sapma açısının hesaplanmasında kullanılan girdiler (Eşitlik 1.4) dijital kumpas yardımıyla elde edilmiştir. Her bir kesim için 8 adet (karşılıklı iki yüzeyden 4 + 4) çizik sapma açısı belirlenmiş ve elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak nihai çizik sapma açısı belirlenmiştir (Şekil 2.26).

K.T.Ü. Merkez Laboratuvarlarında, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak numune yüzeylerinde gözlenen aşınmalar mikro ölçekte irdelenmiştir. Her bir aşındırıcı türü için gerçekleştirilen kesimleri temsilen, K.T.Ü. Maden Mühendisliği laboratuvarlarında, dairesel küçük testerelerle doğal taş yüzeylerinden 2x2x1 cm boyutlarında örnekler hazırlanmıştır (Şekil 2.27). Aşınma karakteristiklerinin karşılaştırmalı olarak değerlendirilebilmesi adına ilgili örnekler kesilen doğal taş numunelerin aynı bölgelerinden

alınmıştır. İletken olmayan kayaç örnekleri, iletkenliğin sağlanması için kaplama cihazında altınla kaplandıktan sonra SEM cihazına yerleştirilerek nemi alınmış ve yüzeyler farklı odaklama seviyelerinde incelenmiş, ayrıca fotoğrafları alınmıştır.



Şekil 2.26. Sapma açısı ve hesabı için ölçülen değerler



Şekil 2.27. SEM analizi için ASJ kesim yüzeylerinden örnek hazırlanması

Elde edilen veriler ışığında, kesme performans ölçümlerinin sonuçları analiz edilmiştir. Kesme yüzeyi üzerinde elde edilen değerlerin (kesme derinliği, kesme-aşınma derinliği, kesme genişliği, sapma açıları ve yüzey pürüzlülükleri) ölçüm hassasiyetleri, standart sapma kullanılarak değerlendirilmiştir. Standart sapma, ortalamanın ne kadar kesin

olduğunun bir ölçüsüdür. Küçük standart sapma değerleri, yüksek kesinlik gösterir (Bland ve Altman, 1996; Aydın vd., 2019; URL-13, 2022). Aşındırıcı ve numune özellikleri ile performans çıktıları arasındaki ilişkiler, korelasyon katsayısı (r) kullanılarak değerlendirilmiştir. Korelasyon katsayısının yorumlanmasında Pearson skalası kullanılmıştır (Tablo 2.14).

Tablo 2.14. Pearson korelasyon katsayısı skalası (Pearson, 1895).

Korelasyon katsayısı mutlak değeri	İlişki
$0,00 < r \leq 0,19$	Çok düşük korelasyon
$0,20 \leq r \leq 0,39$	Düşük korelasyon
$0,40 \leq r \leq 0,59$	Orta korelasyon
$0,60 \leq r \leq 0,79$	Yüksek korelasyon
$0,80 \leq r \leq 1,00$	Çok yüksek korelasyon

Regresyon analizi kullanılarak, kesme derinliği kesme-aşınma derinliğine bağlı olarak modellenmiştir. Benzer şekilde yine regresyon analiziyle, performans göstergeleri, ilişkili oldukları (çok yüksek korelasyon) kayaç özellikleri temelinde modellenmişlerdir. Kesme-aşınma derinliği ve kesme derinliği ölçümleri aynı hat boyunca yapılmıştır ve iki değer birbiriyle sıkı ilişki içerisinde. Bu nedenle, elde edilen her bir ölçüm değeri kullanılarak (ortalama değerler yerine ham veriler kullanılmıştır) kesme derinliğinin kesme-aşınma derinliğine bağlı olarak modellenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen modellerle, kesme derinliği kesme-aşınma derinliğine bağlı olarak tahmin edilebilecektir. Böylelikle, kesme derinliği ölçülmeden kesme performansına yönelik değerlendirmeler yapılabilecektir. Ayrıca, kesme-aşınma derinliğinin numune kalınlığından az olduğu (kesim yüzeylerinden ölçülebildiği) ve kesme derinliğinin ölçülmesinin mümkün olmadığı durumlarda da (numunenin tamamının kesildiği) geliştirilen modeller kolaylıkla kullanılabilir.

Modellemede; lineer, üstel, polinomial, logaritmik ve üssel regresyonlar kullanılmıştır. Her aşındırıcı için her regresyon çeşidinden eşitlikler oluşturulmuştur. Geliştirilen modellerin doğruluk testleri determinasyon katsayısı ve rezidü (artık) analizleriyle gerçekleştirilmiştir. Modellerde bağımlı değişken (Y) olarak kesme derinliği (h_t) ve bağımsız değişken (X) olarak kesme-aşınma derinliği (h_a) kullanılmıştır. Veriler, eğitim ve test modülü olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. 9 ölçüm noktasından (Ek Tablo 1-2) beşinci noktalardan ölçülen değerler test modülü, diğer değerler eğitim modülü olarak seçilmiştir. Modellerin performansları ise, Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE-Mean

Absolute Percentage Error), Ortalama Mutlak Hata (MAE-Mean Absolute Error) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE-Root Mean Square Error) kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu performans kriterlerinin denklemleri eşitlik (2.1)- (2.3)'te verilmiştir (Aydın vd., 2015).

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|e_i|}{y_i} \right) 100 \quad (2.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (2.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (2.3)$$

Burada,

n: Toplam ölçüm sayısı,

e_i : Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki farklar,

y_i : Gerçek değerlerdir.

Tahminlerin doğruluğu, hata tahminine dayalı olarak değerlendirilir, dolayısıyla MAE, RMSE ve MAPE değerleri ne kadar küçükse, tahmin o kadar iyi olur. MAPE, basit genel yüzde terimi ile ifade edildiğinden belirleyici faktördür (Aydın vd., 2015). Tablo 2.15, model değerlendirmesi için MAPE kriterlerini göstermektedir.

Tablo 2.15. Model değerlendirme için tipik MAPE değerleri (Lewis, 1982).

MAPE (%)	Değerlendirme
$MAPE \leq \%10$	Yüksek doğrulukta tahmin
$\%10 < MAPE \leq \%20$	İyi tahmin
$\%20 < MAPE \leq \%50$	Makul tahmin
$MAPE > \%50$	Hatalı tahmin

Önerilen bu modellerin doğruluk testleri için ek olarak rezidü analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir aşındırıcı için kesme derinliğinin tahminine yönelik önerilen modellerin rezidülerinin sıfır doğrusu boyunca rastgele dizilmeleri modellerin doğruluğuna işaret eder (Aydın, 2012).

Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerine bağlı olarak kesme performans tahminini sağlayan istatistik modeller de geliştirilmiştir. Her aşındırıcı grubu için, ilgili performans çıktısıyla çok yüksek korelasyona sahip ($0,80 \leq r \leq 1,00$) kayaç özellikleri arasında tek değişkenli lineer regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bağımsız değişken olarak ilgili kayaç özelliği ve bağımlı değişken olarak ilgili performans çıktısı alınmıştır. Modeller geliştirildikten sonra uyum dereceleri ve tahmin edilen değişkenlerin istatistiksel anlamlılığının teyidi; determinasyon katsayısı, genel uyumun F-testi ve bireysel değişkenlerin t-testi ile yapılmıştır (URL-12). Tek yönlü t testi, örneklem ortalamasının anlamlılığını test etmek üzere kullanılan parametrik bir tekniktir. t-Tablo değeri, bağımsız değişkene ait regresyonda elde edilen t değerinin mutlak değerinden küçük olmalıdır. Benzer bir durum F değerleri için de geçerlidir; elde edilen F değerleri F-tablo değerlerinden büyük olmalıdır. Ronald Fisher tarafından 1920'li yıllarda tek yönlü varyans analizi için ortaya atılıp kullanılmış olan F testi, bir istatistik anlamlılık sınama modelidir. t-tablo değerini belirlemek için (Ek Tablo 4) serbestlik derecesi df bulunur. Bu değer, örnek sayısının 1 eksiği olarak alınır ($n-1$). F-tablo değeri de benzer şekilde belirlenir. Yalnız, burada iki serbestlik derecesi bulunur. F tablosundan (Ek Tablo 5), değeri okumak için df1 (pay serbestlik derecesi), bağımsız değişken sayısı olarak alınır. df2 (payda serbestlik derecesi) ise yine t testinde olduğu gibi örnek sayısının bir eksiğidir (Montgomery vd., 2013). Geliştirilen modellerde 10 farklı kayaç tipi değerleri olduğundan, $df=df2=9$ olarak alınmıştır. t-tablosunda sütundan $df=9$ olan satır seçilir. Sütunu seçmek için ise %95 güven seviyesini gösteren $t_{.95}$ değeri seçilmiştir (tek yönlü = 0,05). İlgili satır ve sütunun kesişiminden t-tablo değeri 1,833 olarak bulunur. Analizler tek değişkenli olduğu için $df1=1$ alınır. F tablosunda (Ek Tablo 5) $df1=1$ ve $df2=9$ değerleri seçilip, %95 güven seviyesi için 0,050 satırına karşılık gelen kısımda kesiştirilerek F-tablo değeri 5,12 olarak bulunmuştur.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Kesme ve Kesme-Aşınma Derinliği

Kesilen kayaç numunelerden ölçülen kesme derinlikleri (h_t) ve standart sapmaları sırasıyla Tablo 3.1 ve 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.1 incelendiğinde kesme derinliklerinin geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. En düşük kesme derinliği değeri 5,00 mm ile plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı lamprofir kesiminden elde edilmiştir. En yüksek kesme derinliği ise 125,94 mm ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı Limra-1’de görülmüştür.

Tablo 3.1. Kesme derinlikleri, h_t (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	37,96	50,47	49,38	56,00	23,01	28,81	33,74	5,84
Lamprofir	39,23	40,40	50,70	57,00	21,11	29,86	27,18	5,00
Bazalt	50,13	48,79	50,78	57,55	26,98	31,69	30,30	5,56
Mermer	43,58	48,76	45,35	57,29	23,81	28,08	32,21	5,26
Traverten	31,73	59,49	53,21	48,78	28,49	28,45	35,78	7,61
Limra-1	93,15	95,68	88,33	125,94	58,57	49,68	74,29	19,21
Limra-2	71,27	92,66	78,05	98,29	52,18	49,72	60,23	16,34
Kayseri Tüf	81,77	97,29	90,70	92,57	58,55	54,92	60,56	17,85
Rize Tüf	81,70	101,82	98,85	99,64	61,04	56,86	64,97	22,21
Bayburt Tüf	105,23	117,80	106,50	121,20	71,05	69,33	80,00	31,53

Tablo 3.2. Kesme derinlikleri standart sapmalar (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,38	2,32	1,44	0,77	0,33	0,56	0,33	0,39
Lamprofir	0,88	1,81	1,90	2,59	1,09	0,74	0,89	0,43
Bazalt	2,01	1,91	0,72	2,61	0,73	2,46	2,22	0,26
Mermer	1,18	3,45	0,35	1,12	1,35	1,13	1,51	0,27
Traverten	0,77	2,17	1,23	1,27	1,76	2,42	0,69	0,34
Limra-1	1,66	4,26	1,85	1,34	0,55	2,91	0,67	0,26
Limra-2	3,14	5,25	3,54	5,56	3,07	0,49	3,83	1,27
Kayseri Tüf	3,22	2,27	0,92	0,93	2,82	3,37	0,74	0,49
Rize Tüf	1,09	0,69	0,68	3,31	1,12	0,41	0,64	1,42
Bayburt Tüf	5,05	3,07	4,73	0,40	0,76	1,81	1,30	1,29

Tablo 3.2’de görüldüğü gibi standart sapmalar da düşük seviyelerdedir. ASJ ile kesim uygulamalarında jetin enerji profilindeki değişim, kesme derinliği boyunca karşılaşılan minerallerin özellikleri ve çakılma bölgesinde meydana gelen türbülanslardan ötürü kesme hattı boyunca farklı kesme derinlikleri elde edilebilmektedir. Bu nedenle, numune kesme hattı boyunca yapılan kesme derinliği ölçümlerinde nispi sapmaların olması beklenilebilir.

Kesme derinliğinin yanında, kesme-aşınma derinliği de kesme performansı adına irdelenmesi gereken bir göstergedir. Kesme-aşınma bölgesi, deformasyon-aşınma bölgesinden daha düzgün yüzeylere sahiptir. Dolayısıyla, kesme-aşınma derinliğinin yüksek olması daha iyi bir kesme performansını göstermektedir. Numune kesme yüzeylerinden ölçülen kesme-aşınma derinlikleri (h_a) ve standart sapmaları Tablo 3.3 ve 3.4’te verilmektedir.

Tablo 3.3. Kesme-aşınma bölgesi derinlikleri, h_a (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	11,36	18,96	19,21	18,23	9,04	9,87	13,41	2,29
Lamprofir	17,06	23,26	22,97	25,39	9,95	13,45	7,52	2,53
Bazalt	21,06	21,13	20,62	26,51	13,83	13,63	11,13	2,80
Mermer	15,96	23,28	21,46	23,03	12,18	13,74	11,79	2,67
Traverten	9,59	21,76	19,39	19,24	12,79	11,63	14,66	3,51
Limra-1	30,08	44,23	36,05	40,61	26,04	26,33	29,23	9,67
Limra-2	25,29	29,88	29,40	37,35	20,22	18,92	19,70	6,25
Kayseri Tüf	29,14	31,41	33,72	35,35	22,34	20,27	22,06	7,25
Rize Tüf	29,50	38,07	36,98	41,33	23,07	20,18	21,06	7,38
Bayburt Tüf	37,69	49,03	45,86	45,87	29,60	29,23	33,14	13,26

Tablo 3.4. Kesme-aşınma bölgesi derinlikleri standart sapmalar (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,70	1,79	1,69	0,77	1,15	1,28	0,65	0,22
Lamprofir	1,10	2,07	0,92	1,42	1,43	0,77	1,22	0,23
Bazalt	1,67	2,28	1,10	1,16	0,73	0,77	1,08	0,19
Mermer	0,90	1,53	1,23	0,60	1,14	0,93	1,21	0,38
Traverten	1,20	2,13	1,51	0,93	1,29	1,67	0,47	0,13
Limra-1	3,14	2,37	1,61	2,63	2,67	2,18	2,94	0,78
Limra-2	1,38	1,58	1,50	3,18	2,27	1,11	1,13	0,60
Kayseri Tüf	0,96	2,27	1,98	1,03	1,81	1,48	1,21	0,60
Rize Tüf	1,79	2,42	3,26	2,85	1,80	1,67	1,05	0,44
Bayburt Tüf	1,46	2,12	1,27	4,19	2,01	1,19	1,30	1,65

Kesme-aşınma derinlikleri de geniş bir aralıkta değişmektedir. En düşük kesme-aşınma derinliği (2,29 mm) plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı andezit kesiminden elde edilmiştir. En yüksek kesme-aşınma derinliği ise (49,03 mm) AOB ile kesilen Bayburt Tüf'te görülmüştür. Tablo 3.4'te görüldüğü gibi, standart sapmalar da düşük seviyelerdedir. Kesme derinliğinde olduğu gibi kesme-aşınma bölgesi derinliklerinin de kesim hattı boyunca düz bir çizgide olmadığı, inişli-çıkışlı bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu inişli-çıkışlı yapı, kesme-aşınma derinliği ölçümlerinde sapmaların oluşmasına yol açmıştır.

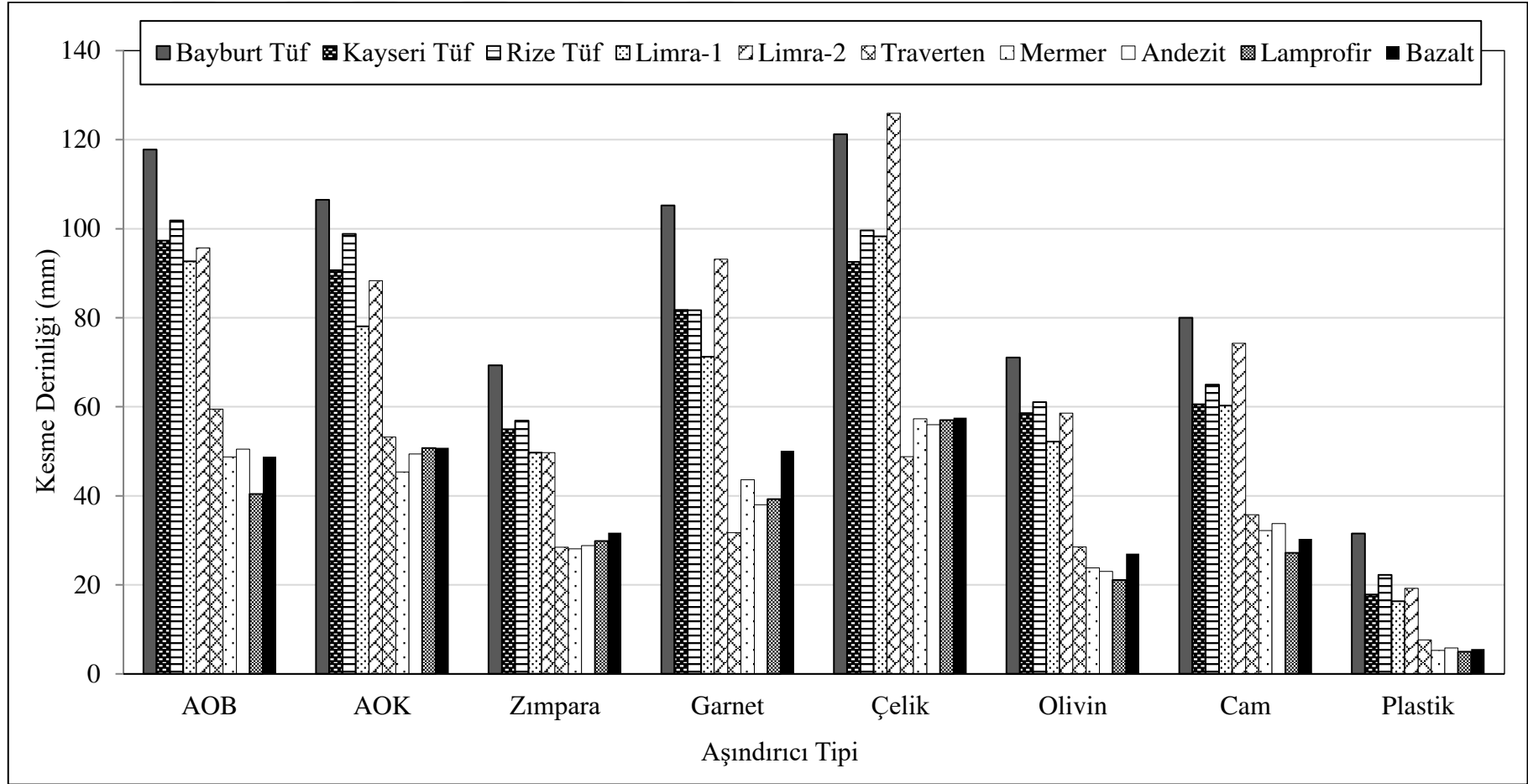
3.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme Derinliğine Etkileri

Örnek kesme derinliği temelinde aşındırıcılar, Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de de görüleceği üzere üç farklı gruba ayrılabilir. Farklı tip kayalar üzerinde; çelik (48,78 ila 125,94 mm), alüminyum oksitler (AOB ve AOK) (40,40 ila 117,80 mm) ve garnet (31,23 ila 105,23 mm) ile yüksek ve birbirlerine yakın kesme derinlikleri elde edilmiştir. Bunlara kıyasla olivin (21,11-71,05 mm), zımpara (28,08-69,33 mm) ve cam (27,18-80,00 mm) daha düşük ve birbirine yakın kesme derinlikleri oluşturmuşlardır ve nispeten orta kesme performansı gösterdikleri söylenebilir. Ancak plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerde çok düşük kesme derinlikleri (5,00-31,53 mm) elde edilmiştir. Bu açıdan, plastik, çok zayıf bir kesme performansı göstermiştir. Plastik türü aşındırıcının etkili bir kesim gerçekleştiremediği tespit edilmiştir.

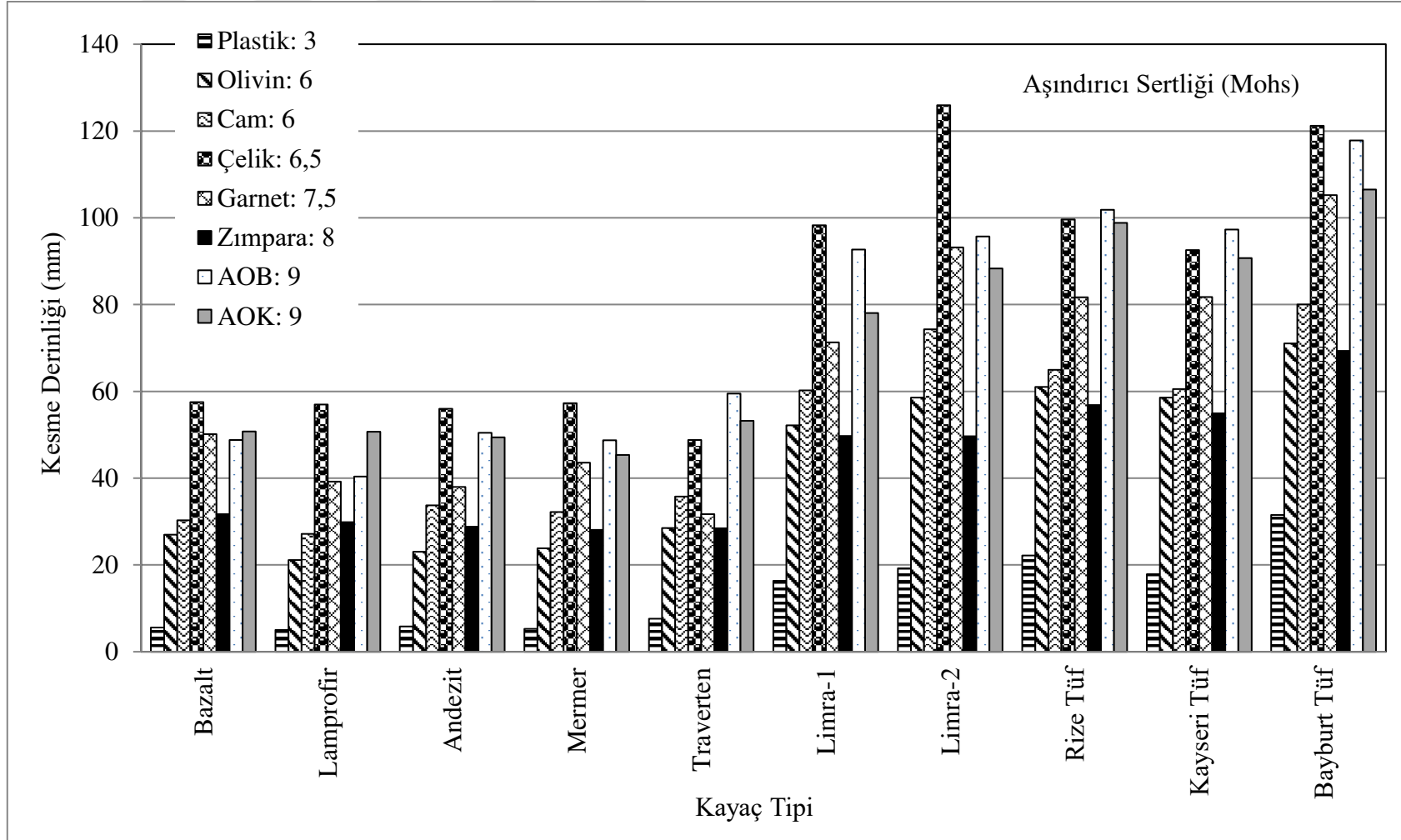
Kesme derinliğinin aşındırıcının sertlik ve yoğunluğuna bağlı olarak değişimi sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmektedir. Tablo 3.5'te ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle kesme derinlikleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir.

Tablo 3.5. Kesme derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

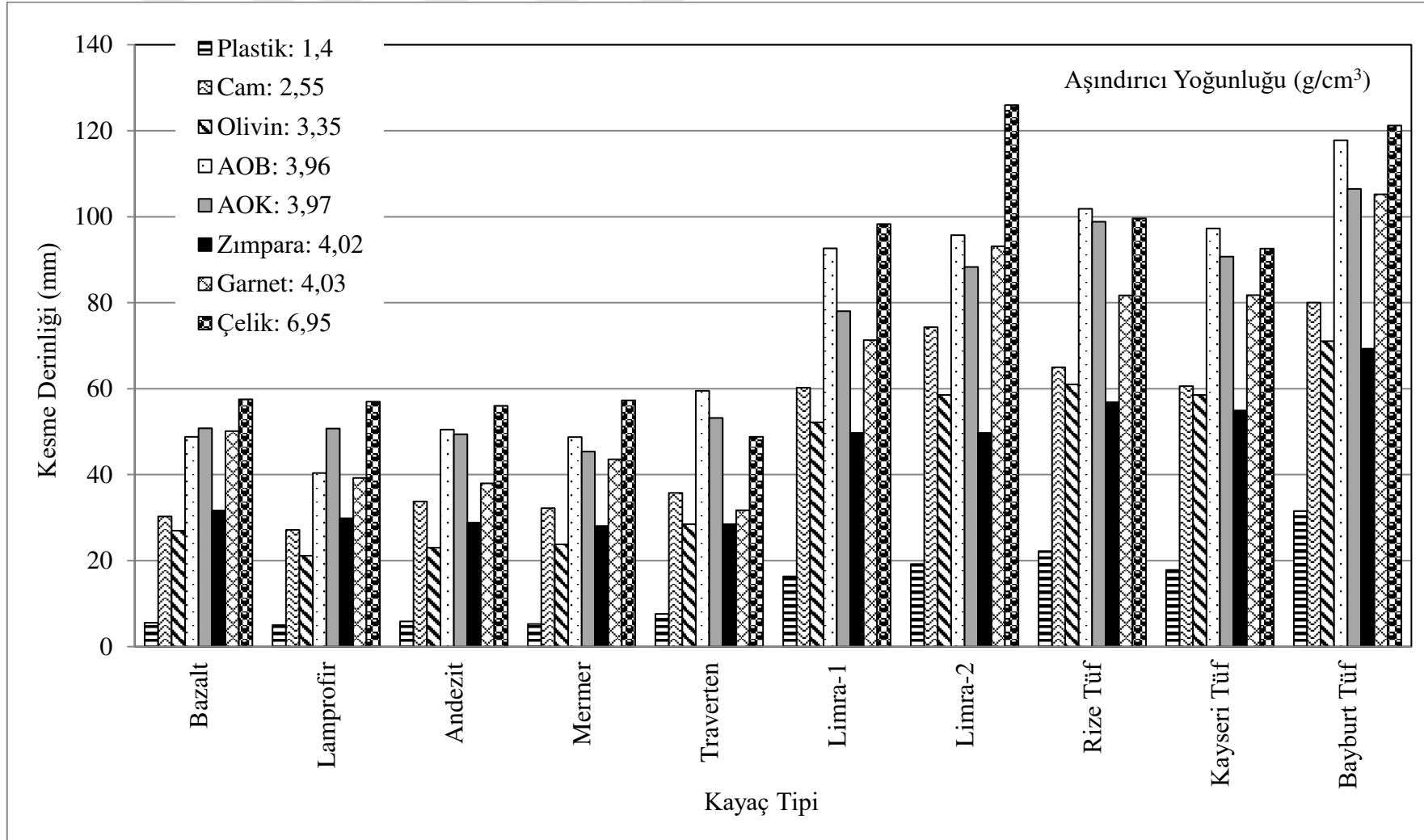
Aşındırıcı Özelligi	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	0,78	0,73	0,76	0,73	0,81	0,72	0,59	0,81	0,82	0,76
Yoğunluk (g/cm ³)	0,83	0,87	0,80	0,84	0,63	0,81	0,84	0,75	0,74	0,78



Şekil 3.1. Aşındırıcı tipine göre kesme derinlikleri



Şekil 3.2. Aşındırıcı sertliğine göre kesme derinlikleri



Şekil 3.3. Aşındırıcı yoğunluğuna göre kesme derinlikleri

Şekil 3.2 ve 3.3 ile Tablo 3.5 incelendiğinde, genel olarak daha yüksek yoğunluk ve sertliğe sahip aşındırıcılarla daha yüksek kesme derinliklerinin elde edildiği görülmektedir. Başka bir deyişle, kesme derinlikleri ile aşındırıcıların yoğunluk (kayaç tipine göre r : 0,63-0,87) ve sertlikleri (kayaç tipine göre r : 0,59-0,82) arasında yüksek-çok yüksek (istisna 1 adet orta hariç) ve doğru orantılı ilişki tespit edilmiştir. Aydın vd. (2019), kesme derinliğini etkileyen en önemli aşındırıcı özelliklerinin yoğunluk ve sertlik olduğunu belirtmiştir. Ek olarak, Fowler vd. (2009), kesilecek numune sertliğinin aşındırıcı sertliğine benzer veya ondan daha yüksek olduğunda kesme performansının düştüğünü belirtmiştir. Sabit bir aşındırıcı besleme miktarında (kütlesel debide) farklı yoğunluktaki aşındırıcıların jet içerisindeki oranları (ağırlıkça) eşit olacaktır. Bunun bir sonucu olarak, çeşitli aşındırıcılarla meydana getirilen jetlerin (karışım odasında) başlangıç kinetik enerjilerinin eşit olması beklenebilir. Bunun yanı sıra, yoğunluğu daha düşük olan aşındırıcıların jet içerisinde hacimce oranları daha fazla olacaktır. Başka bir deyişle, birim hacimdeki aşındırıcı tane sayısı (benzer boyut dağılımı için) daha fazla olacaktır. Bilindiği gibi, ASJ içerisindeki aşındırıcı taneler nozül içerisinde (aşındırıcı-aşındırıcı çarpışması ve aşındırıcının nozülün iç yüzeylerine çarpması) ve numune içerisinde (aşındırıcı-aşındırıcı çarpışması ve aşındırıcının numune iç yüzeyine çarpması) dağılmakta/parçalanmakta ve boyutları küçülmektedir. Özellikle yüksek aşındırıcı besleme oranlarında, hacimsel konsantrasyonu fazla olan aşındırıcıların, birbirlerine ve diğer yüzeylere daha sıklıkla çarpması beklenebilir. Bu ise aşındırıcı tanelerin daha fazla parçalanmasına sebep olur. Boyutu küçülen aşındırıcı taneler, azalan darbe etkisinden ötürü etkin bir mikro kesme gerçekleştirememektedir. Ayrıca, sıklıkla çarpışan aşındırıcı tanelerin hızlarının düşmesi sonucu ASJ'nin kinetik enerjisi de azalmaktadır. Ek olarak, aşındırıcı oranının hacimsel artmasıyla odaklama tüpünde hareket eden suyun hızında da azalma meydana gelmekte ve yine kinetik enerji düşmektedir. Dolayısıyla, yoğunluğu daha düşük aşındırıcıların kullanıldığı kesimlerde (özellikle yüksek aşındırıcı besleme miktarları için) jetin kinetik enerjisi daha hızlı tükenmekte ve daha düşük kesme derinlikleri elde edilmektedir (Vie, 1983; Miller ve Archibald, 1991; Ranney, 1995; Tazibt vd., 1996; Momber, 1998 ve 2001; Engin, 2012; Karakurt vd., 2012b; Long vd., 2017).

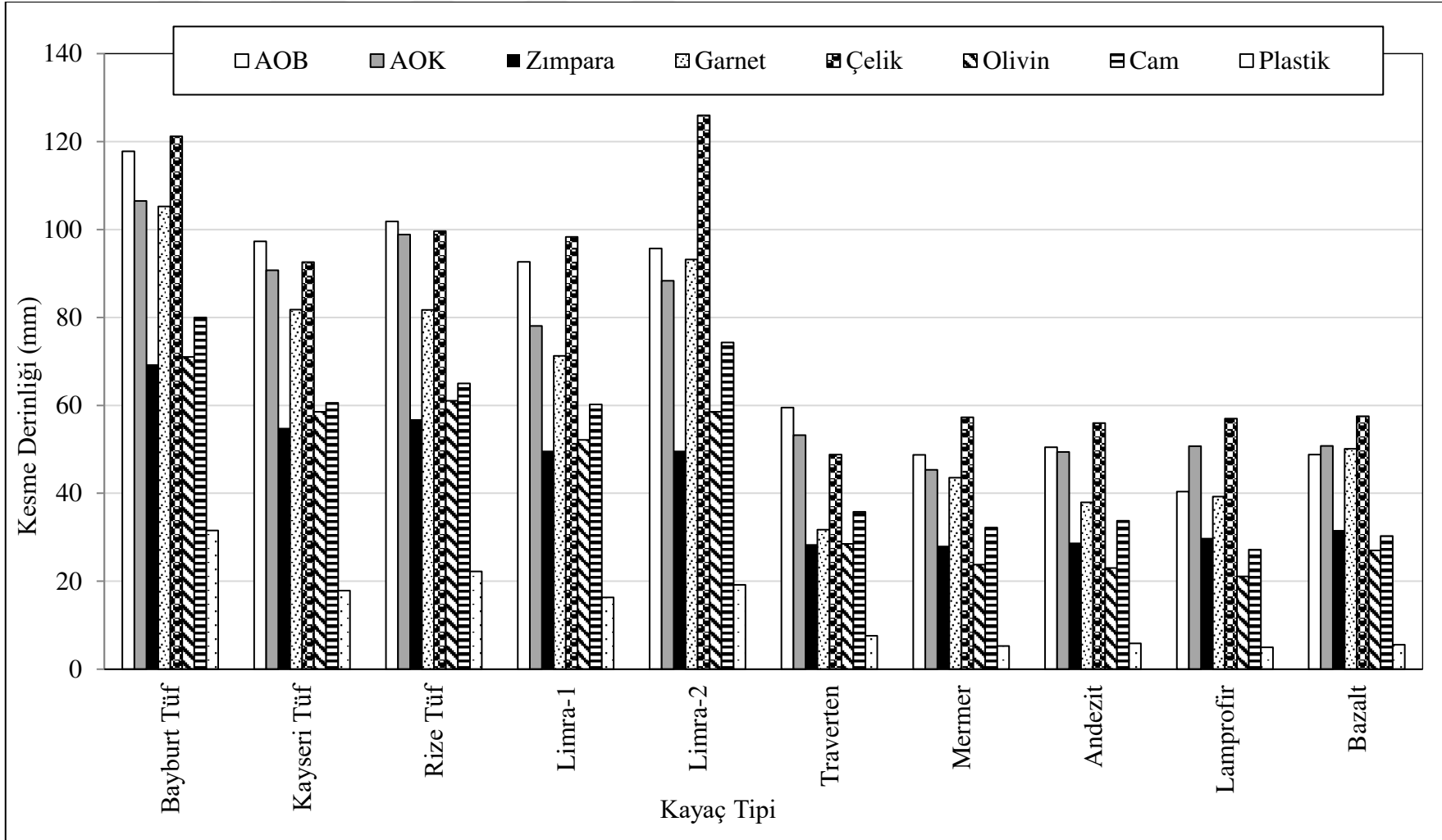
3.1.2. Kayaç Özelliklerinin Kesme Derinliğine Etkileri

Kayaç tipi ve fiziko-mekanik özellikleri temelinde kesme derinlikleri sırasıyla Şekil 3.4; Şekil 3.5-3.11’de sunulmaktadır. Buna göre, kesme derinliği değerlerine göre kayaçları iki gruba ayırmak mümkündür. Tüf ve Limra türü kayaçlarda daha derin kesimler meydana gelirken (aşındırıcı tipine göre h_t : 16,34-125,94 mm), diğerlerinde kesme derinlikleri daha düşüktür (aşındırıcı tipine göre h_t : 5,00-59,49 mm). Tablo 3.6’da kayaçların fiziksel ve mekanik özellik değerleriyle kesme derinlikleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmektedir.

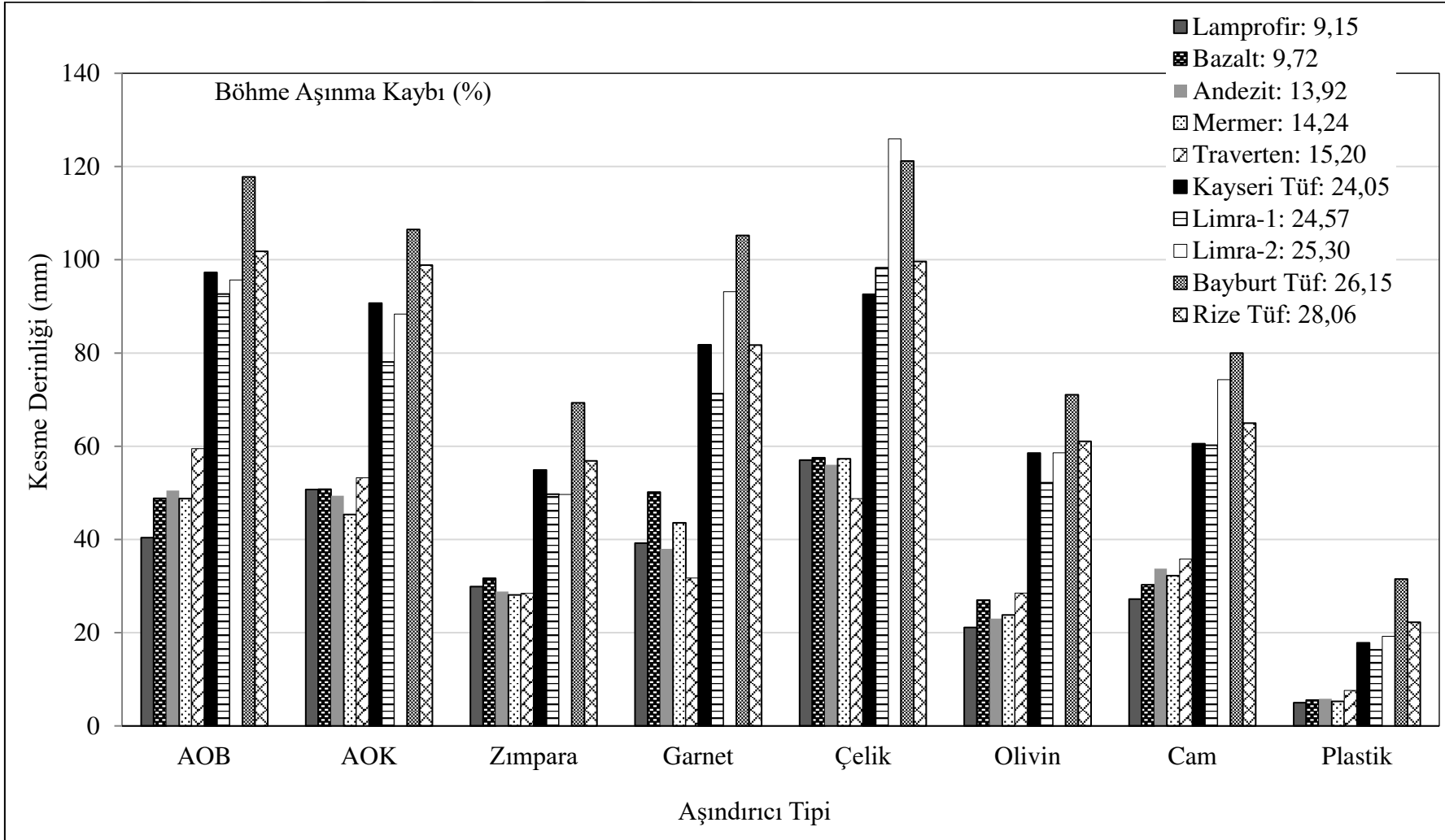
Tablo 3.6. Kesme derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,96	0,83	0,82	-0,85	-0,86	-0,89	-0,83	-0,83	-0,74	-0,68
AOK	0,93	0,89	0,86	-0,86	-0,84	-0,88	-0,75	-0,74	-0,65	-0,72
Zımpara	0,90	0,91	0,90	-0,88	-0,81	-0,87	-0,74	-0,74	-0,66	-0,74
Garnet	0,87	0,85	0,83	-0,79	-0,79	-0,83	-0,69	-0,71	-0,58	-0,66
Çelik	0,89	0,76	0,73	-0,71	-0,82	-0,85	-0,74	-0,74	-0,57	-0,55
Olivin	0,95	0,85	0,83	-0,83	-0,85	-0,88	-0,78	-0,78	-0,68	-0,68
Cam	0,95	0,81	0,79	-0,80	-0,86	-0,87	-0,82	-0,82	-0,68	-0,62
Plastik	0,90	0,89	0,90	-0,88	-0,84	-0,88	-0,78	-0,77	-0,65	-0,68

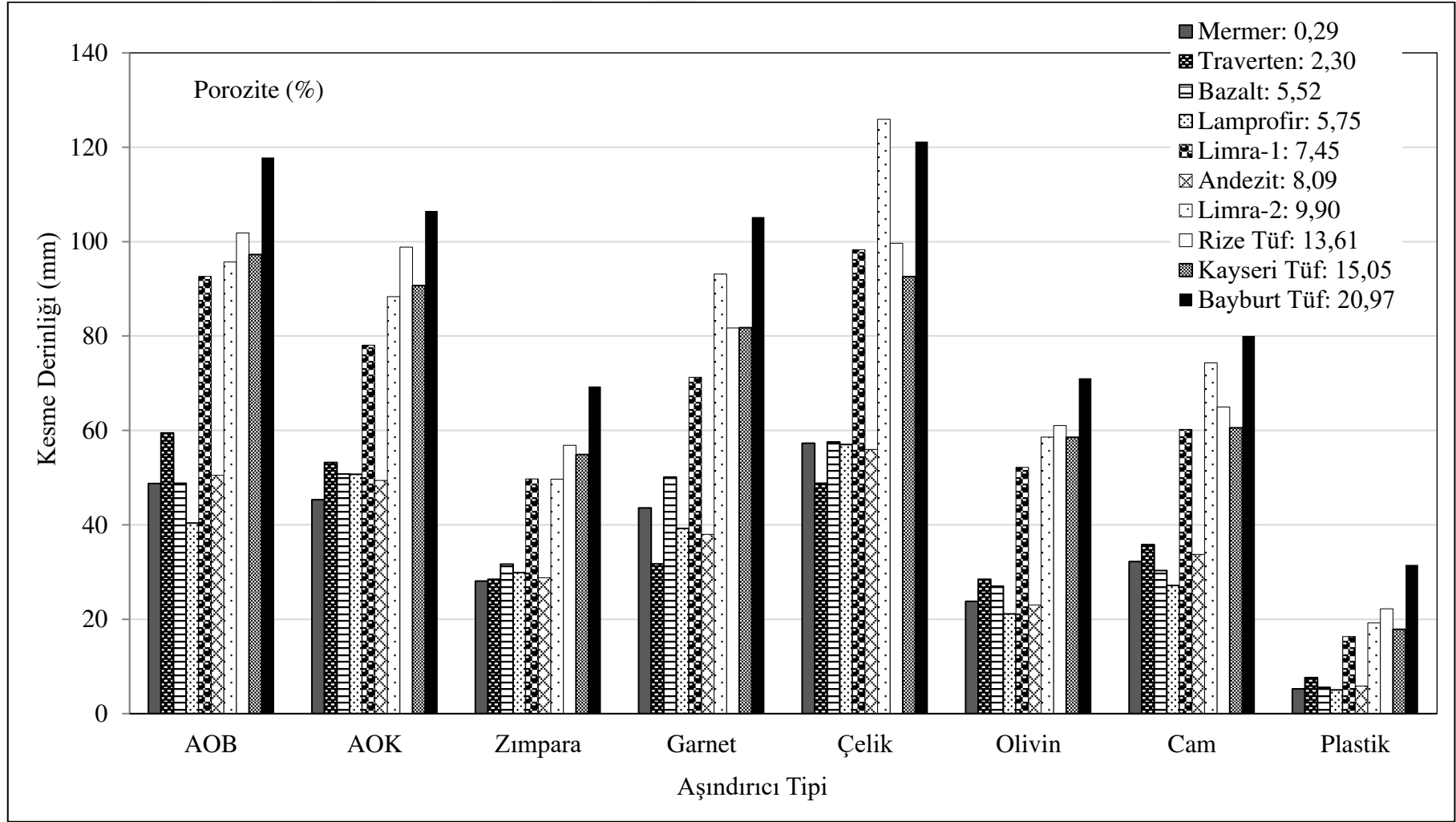
Tablo 3.6. ve Şekil 3.5-3.11 incelendiğinde, kesme derinliğinin kayaçların Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranlarıyla doğru orantılı; yoğunluk, sertlik, dayanım ve ultrasonik dalga hızıyla ters orantılı bir eğilim içerisinde olduğu görülmektedir.



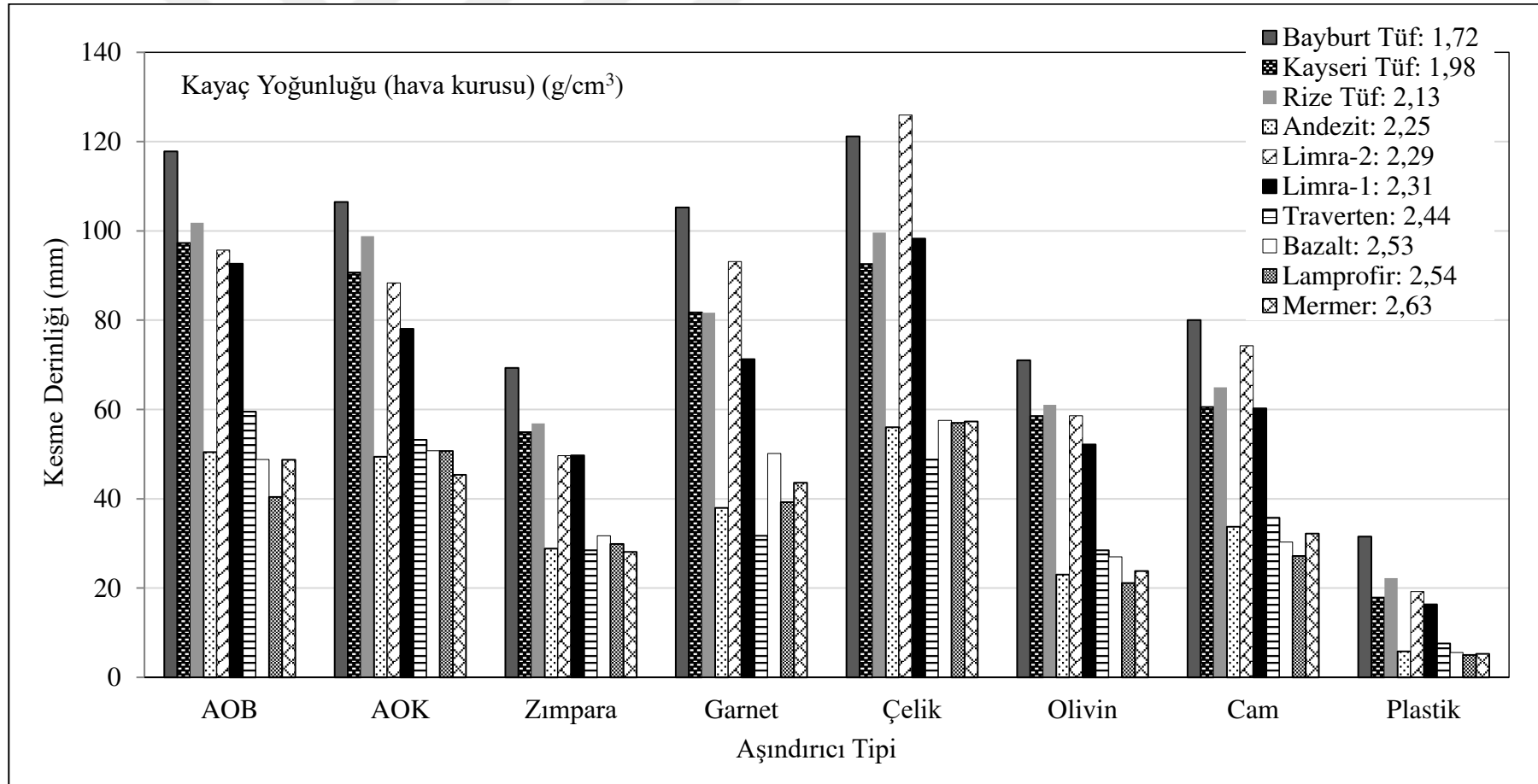
Şekil 3.4. Kayaç tipine göre kesme derinlikleri



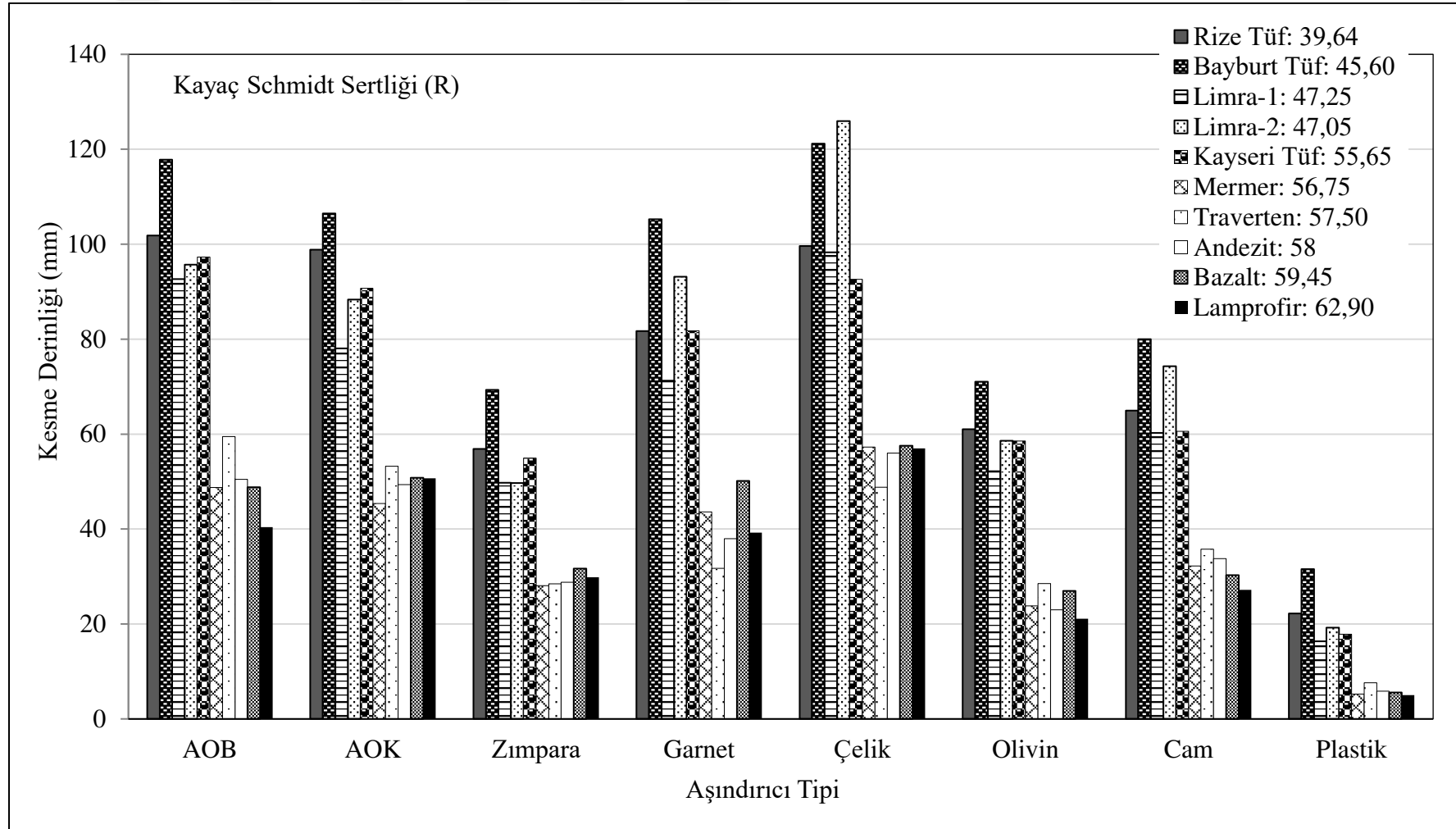
Şekil 3.5. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre kesme derinlikleri



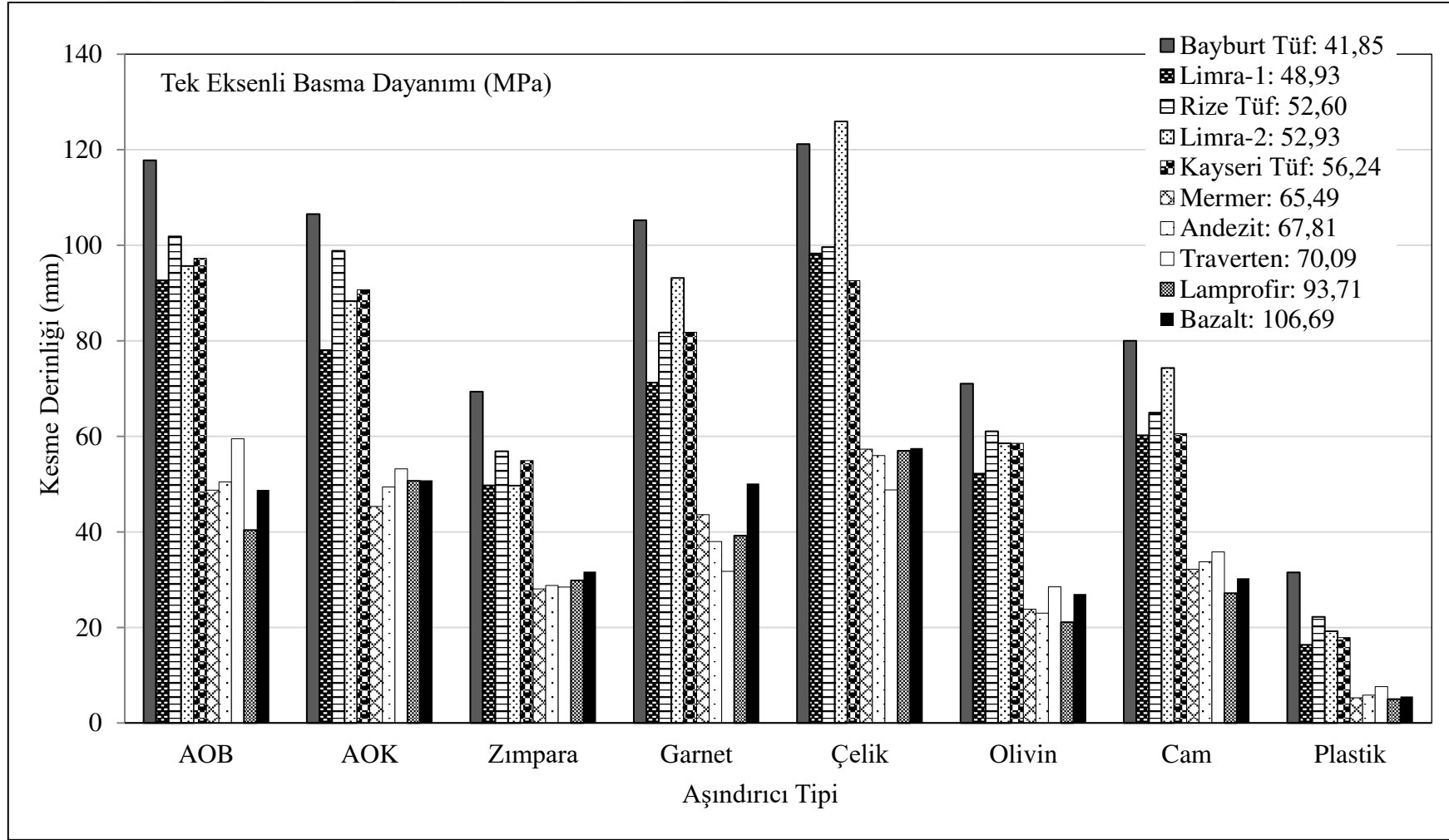
Şekil 3.6. Kayaçların porozitelerine göre kesme derinlikleri



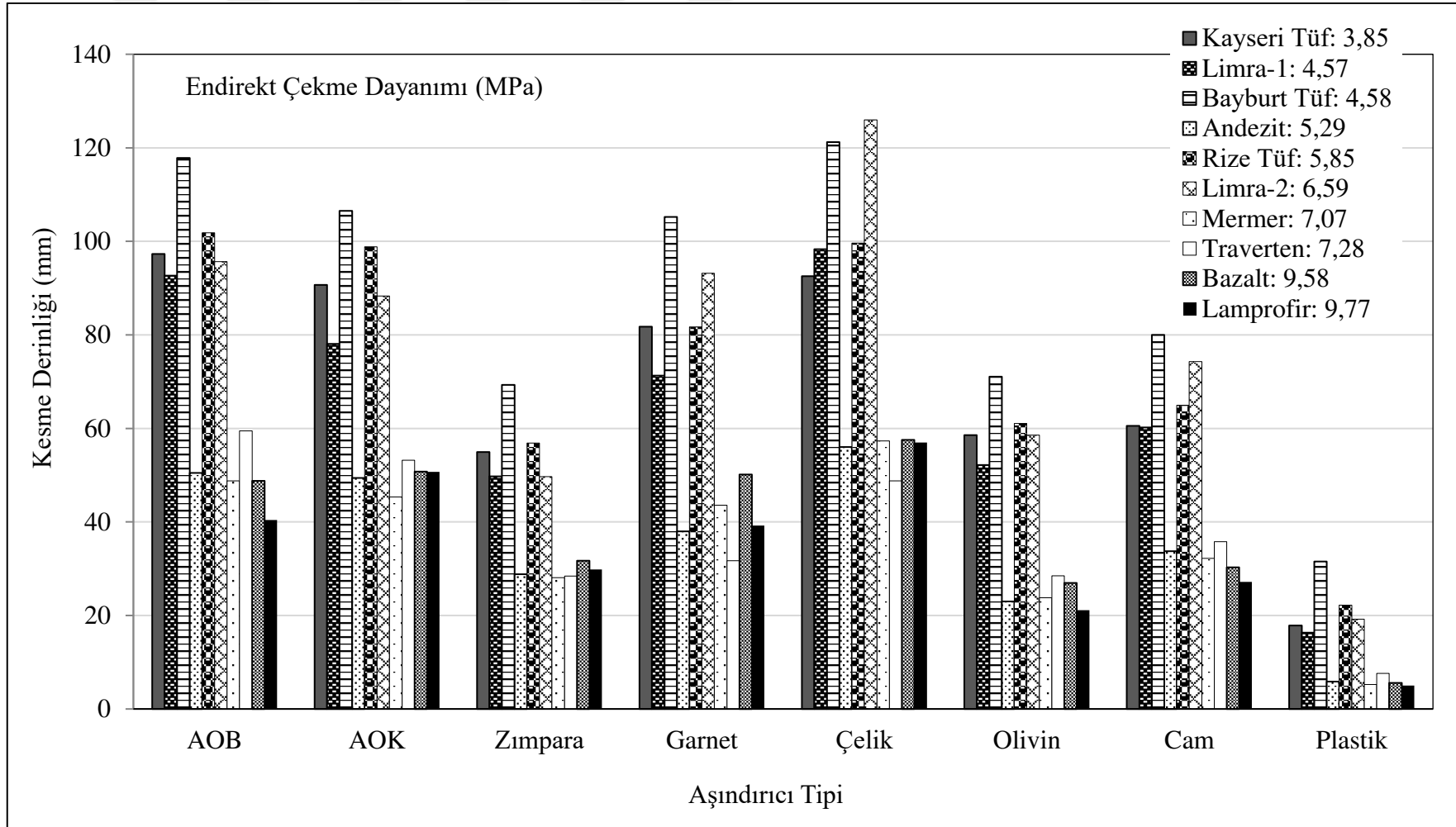
Şekil 3.7. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre kesme derinlikleri



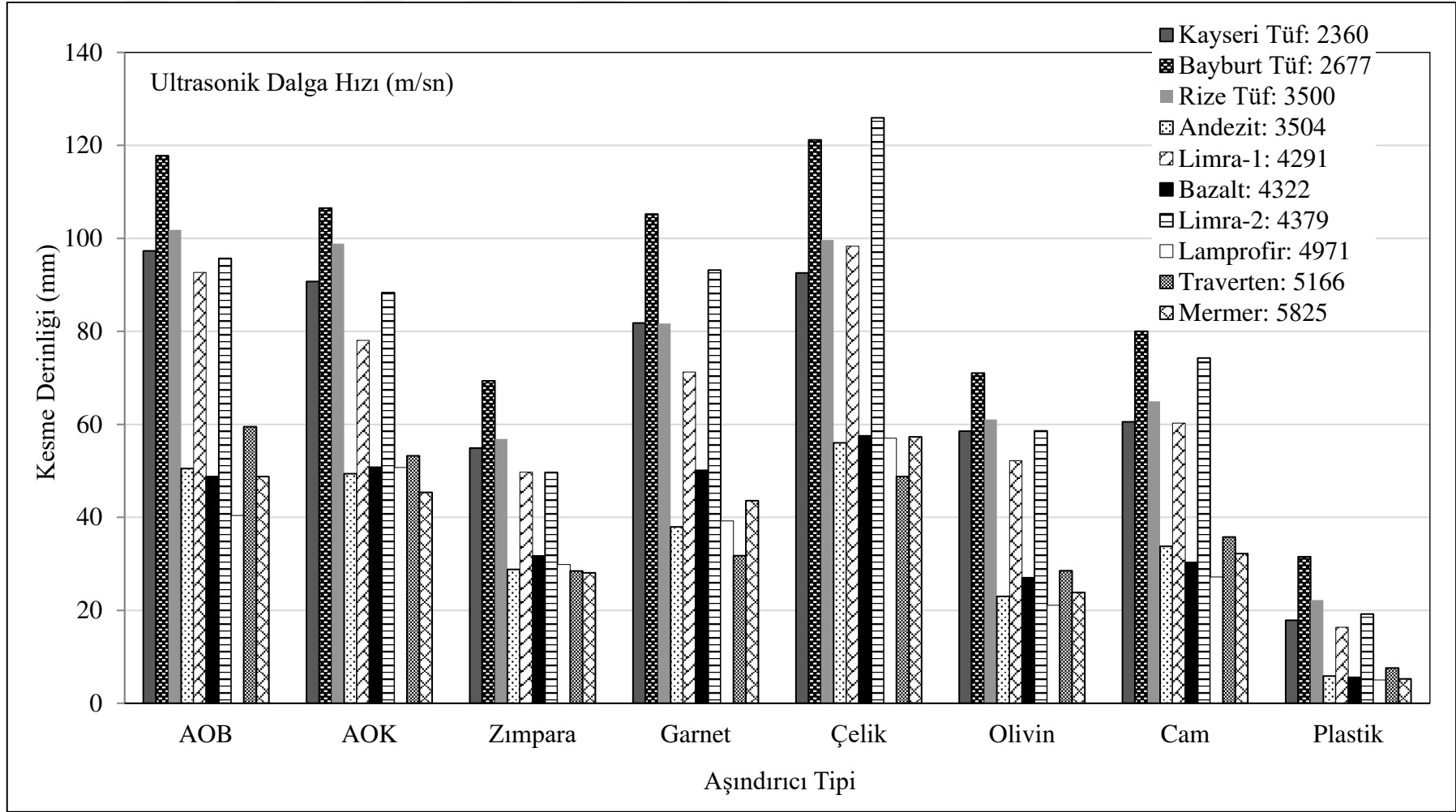
Şekil 3.8. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre kesme derinlikleri



Şekil 3.9. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre kesme derinlikleri



Şekil 3.10. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre kesme derinlikleri



Şekil 3.11. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre kesme derinlikleri

Böhme aşınma kaybı ile kesme derinliği arasında çok yüksek korelasyon (aşındırıcı tipine göre $r:0,87-0,96$) bulunmuştur. ASJ ile kesme en temelde jetin numuneden aşındırma yoluyla malzeme uzaklaştırması işlemidir. Dolayısıyla aşınma kaybı yüksek olan, yani aşınmaya karşı daha dirençsiz olan kayaçlarda daha etkin bir kesme işlemi gerçekleştirilmiş ve sonucunda yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir. Engin (2012), kesme derinliğinin Böhme aşınma kaybıyla arttığını tespit etmiştir. Benzer şekilde İnal (2011), Böhme aşınma kaybı ile kesme derinliği arasında doğru orantı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, Engin vd., (2013), kayaçların aşınma oranları arttıkça spesifik enerjinin azaldığını bulmuşlardır. Spesifik enerjinin azalması, jetin kesme derinliği boyunca birim zamanda daha fazla yol almasını göstereceğinden kesme derinliği artacaktır.

Benzer bir eğilim porozite ve su emme kapasitesi ile kesme derinliği arasında görülmektedir. Efektif porozite ve ağırlıkça su emme oranına bağlı olarak kesme derinlikleri artma eğilimindedir. Bu değerler ile kesme derinlikleri arasında yüksek-çok yüksek korelasyonlar elde edilmiştir (aşındırıcı tipine göre, porozitede $r: 0,76-0,91$; su emme oranında $r: 0,73-0,90$). Jetin, kayaçların katı kısmına kıyasla gözeneklerde daha hızlı hareket etmesi beklenir. Bu da yüksek porozite değerlerine sahip kayaçlarda yüksek kesme derinliklerinin elde edilmesi anlamına gelir. Agus vd. (1993), porozitenin artmasıyla spesifik kesme enerjisinin azaldığını belirlemişlerdir. Spesifik kesme enerjisinin azalması jetin kesme derinliği boyunca birim miktar ilerleme için daha az enerji harcanacağı anlamına geleceğinden, kesme derinliği derinliğinin artması söz konusu olacaktır. Benzer şekilde Engin (2012), artan porozite ile kesme derinliğinin arttığını belirlemiştir. Su emme kapasitesi, Ünal ve Altınok'un (2019) belirttiği gibi porozite ile yakından ilişkilidir. Su emme kapasitesi yüksek olan bir kayaç, su emme kapasitesi düşük olan kayaca göre daha fazla kırılma, porozite, yarıma, zayıf bağ malzemesi ve sınırlara sahip olabilmektedir (Karakurt vd., 2012b; Engin 2006). Dolayısıyla, kesme derinliğinin su emme kapasitesi ve etkin porozite ile ilişkisi oldukça benzerdir. Bundan dolayı (kayaçlarda aynı sıralamada sonuçlar elde edildiğinden) su emme oranı ve kesme derinliği arasındaki ilişkiye yönelik herhangi bir görsel sunulmamıştır.

Kayaçların diğer özellikleriyle kesme derinlikleri arasında ise ters oranlı bir eğilim tespit edilmiştir. Yoğunluk ile kesme derinliği arasında yüksek-çok yüksek korelasyonlar elde edilmiştir (aşındırıcı tipine göre $r: -0,71 - -0,88$). Aynı kesme derinliklerini elde etmek için yüksek yoğunluklu kayaçlardan düşük yoğunluğa sahip olanlara göre ağırlıkça daha fazla malzemenin uzaklaştırılması gerekir. Bunun bir sonucu olarak düşük yoğunluklu

kayaçlarda daha fazla kesme derinlikleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, Engin (2012) ve Karakurt vd. (2012b), yoğunlukları yüksek kayaçlarda daha düşük kesme derinlikleri elde etmişlerdir.

Schmidt sertliği ile de kesme derinliği arasında yüksek-çok yüksek korelasyonlu ilişki (ters orantılı) tespit edilmiştir (aşındırıcı tipine göre r : -0,79 – -0,89). Bilindiği gibi aşınma mekanizmalarında en önemli faktör, iki malzemenin (aşındırıcı ve aşınan malzeme) sertlikleri arasındaki farktır. Bu fark ne kadar büyük olursa aşındırma işleminin o kadar verimli olduğu söylenebilir (Engin 2012). Dolayısıyla, Schmidt sertliğinin artmasına bağlı olarak kesme derinliklerinin genel olarak bir azalma eğiliminde olduğu görülmüştür. Literatürdeki bazı çalışmalar (Vie, 1983; Engin, 2012; Karakurt vd., 2012b), elde edilen bu sonuçları desteklemektedir.

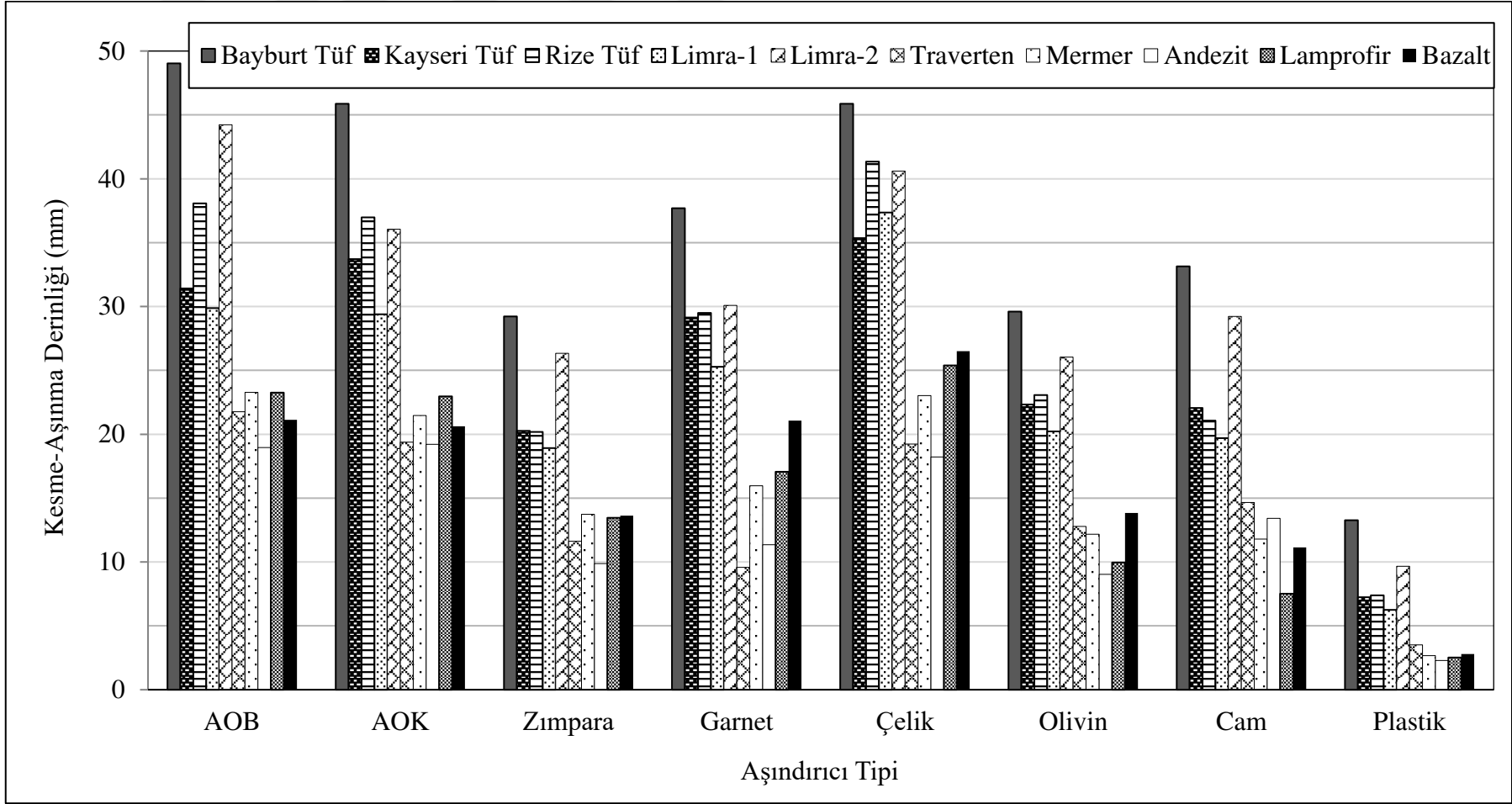
Öte yandan, artan kayaç dayanımıyla beraber kesme derinliğinin azaldığı tespit edilmiştir. Jet (su-aşındırıcı karışımı) tarafından kesilecek numune yüzeyine uygulanan kuvvet kayacın tek eksenli basma dayanımını aştığında kayaç kesilmeye başlamaktadır (Engin 2012). Agus vd. (1993), tek eksenli basma dayanımının artmasıyla spesifik enerjinin arttığını (dolayısıyla kesme derinliğinin azaldığını) ortaya koymuştur. Düşük dayanımlı bir kayaca nazaran dayanımı yüksek olan bir kayacın kesilmesinde jetin hızı ve enerjisi daha çabuk tükenmektedir. Bu nedenle, kayaç dayanımının artmasıyla kesme derinliğinin azalması beklenebilir. Çalışmada genel olarak tek eksenli basma dayanımları daha düşük olan kayaçlarda daha yüksek kesme derinlikleri elde edilmiştir (aşındırıcı tipine göre r : -0,69 – -0,83). Benzer bulgular Momber ve Kovacevic (1997), Engin (2006) ve Oh ve Cho (2014) tarafından da sunulmuştur. Nokta yük dayanımı, tek eksenli basma dayanımıyla yakından ilişkilidir (Chau ve Wong, 1996; Fener vd., 2005; ISRM, 2007; Kohno ve Maeda, 2018). Bu sebepten, nokta yük dayanımı ve tek eksenli basma dayanımının kesme derinliği üzerinde benzer etkilerinin olduğu söylenebilir. Basma dayanımlarının yanında kayaçların çekme mukavemetindeki artışla birlikte de kesme derinliği azalma eğilimi göstermiştir. Ancak, kesme derinliği ile endirekt çekme dayanımı arasındaki korelasyon basınç dayanımlarına göre daha düşüktür. Orta-yüksek korelasyon değerleri elde edilmiştir (aşındırıcı tipine göre r : -0,57 – -0,74). Tek eksenli sıkışma altındaki bir numunede sıkışma eksenine dik yönde çekme kuvvetleri oluşur. Kesme süresince uygulanan jet basıncının bir sonucu olarak, tezgâh üzerinde sabit duran numunenin alt yüzeylerinde yanlara doğru çekme kuvvetleri meydana gelir. Böylece jet, yanal dirençle karşılaşarak enerjisinin bir bölümünü bu dirence karşı tüketir. Dolayısıyla çekme dayanımı daha yüksek olan kayaçta jetin enerjisi daha hızlı

tükeneceğinden kesme derinliği boyunca da enerjisi daha çabuk tükenecek ve kesme derinliği düşecektir. Literatürde, kesme derinliği ile çekme mukavemeti arasındaki ilişkiye odaklanan hemen hemen hiçbir çalışmaya rastlanılmamıştır. Yalnızca, Engin (2006), endirekt çekme dayanımının artmasıyla kesme derinliğinin üstel bir fonksiyonla azaldığını belirtmiştir.

Kesme derinliğiyle ultrasonik dalga hızı arasında orta-yüksek korelasyonlu (aşındırıcı tipine göre $r: -0,55 - -0,74$) ilişki tespit edilmiştir. Bir başka deyişle; ultrasonik dalga hızının artmasıyla kesme derinliği azalma eğilimi göstermiştir. Bilindiği gibi ultrasonik dalgalar katı içinde hava ve sıvıdan daha hızlı hareket ederler. Bu sebepten kırık, çatlak ve gözenek gibi kayaç boşluklarının azalmasıyla ultrasonik dalga hızı artmaktadır (ISRM, 2007; Aydın, 2014).

3.1.3. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme-Aşınma Derinliğine Etkileri

Kesme-aşınma derinliği temelinde aşındırıcıların performansı Şekil 3.12’de görülmektedir. Bu performans göstergesi temelinde de aşındırıcılar üç gruba ayrılabilir. Her kayaç kendi içerisinde değerlendirildiğinde; çelik (18,23-45,87 mm) ve alüminyum oksitler (AOB ve AOK) (18,96-49,03 mm) ile yüksek ve birbirlerine yakın kesme-aşınma derinlikleri elde edilmiştir. Bunlara kıyasla garnet (9,59-37,69 mm), olivin (9,04-29,60 mm), zımpara (9,87-29,23 mm) ve cam (7,52-33,14 mm) daha düşük ve birbirine yakın kesme-aşınma derinlikleri oluşturmuş, nispeten orta kesme performansı göstermişlerdir. Plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerde ise çok düşük kesme-aşınma derinlikleri (2,29-13,26 mm) elde edilmiştir. Garnetin, kesme derinliğinde ilk grupta, kesme-aşınma derinliğinde ise ikinci grupta (orta kesme performansı) yer aldığı görülmektedir. Tablo 3.7’de aşındırıcı özellikleri ile kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyonlar verilmektedir. Kesme-aşınma derinliğinin aşındırıcıların sertlik ve yoğunluğuyla ilişkisinin kesme derinliğine benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.12. Aşındırıcı tipine göre kesme-aşınma derinlikleri

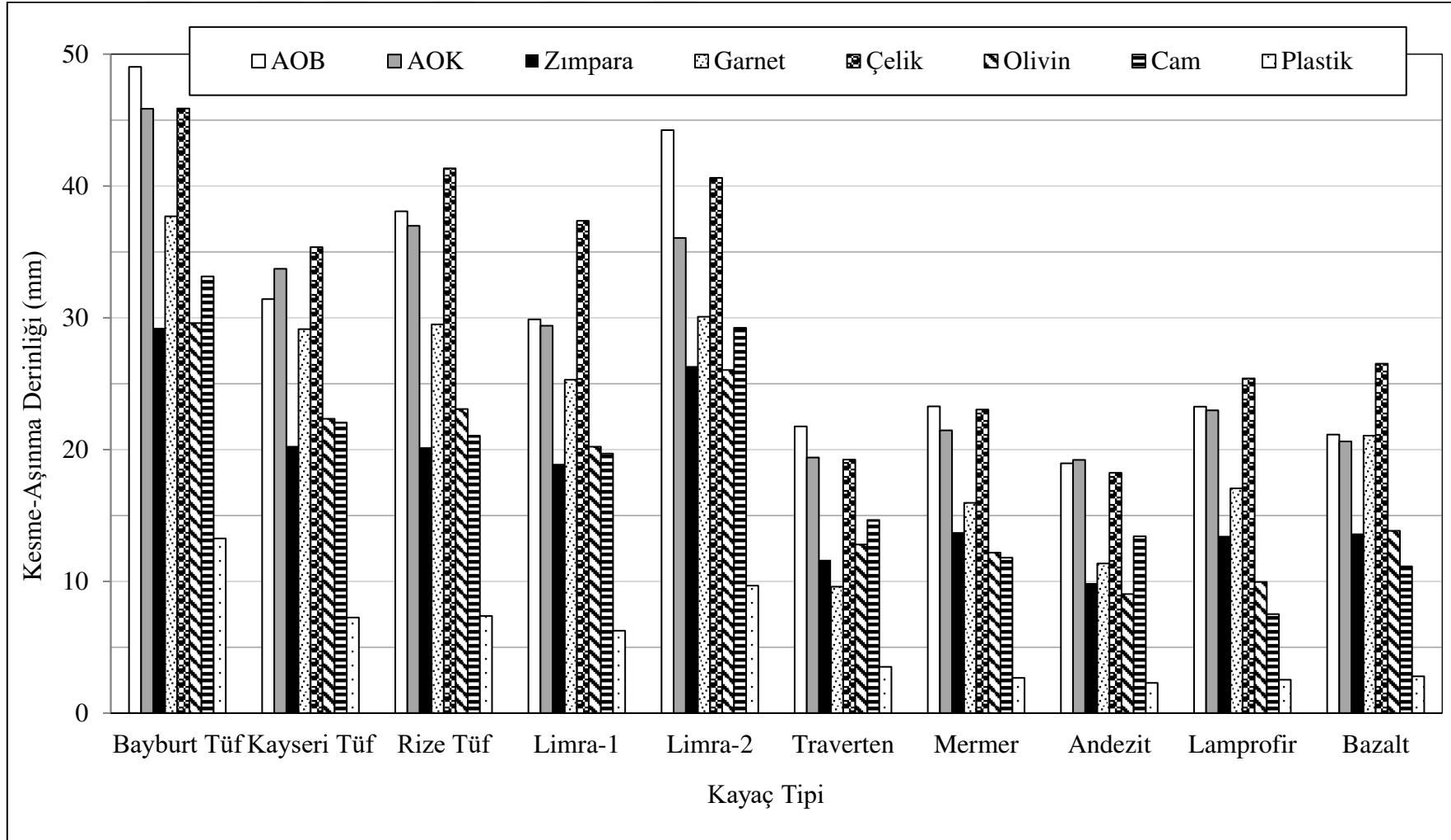
Tablo 3.7. Kesme-aşınma derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı Özellği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	0,72	0,78	0,78	0,83	0,74	0,80	0,69	0,74	0,78	0,82
Yoğunluk (g/cm ³)	0,89	0,84	0,68	0,80	0,63	0,74	0,89	0,82	0,81	0,72

Kesme derinliğinde olduğu gibi genel olarak daha yüksek yoğunluk ve sertliğe sahip aşındırıcılarla daha yüksek kesme-aşınma derinlikleri elde edilmiştir. Başka bir deyişle, kesme-aşınma derinlikleri ile aşındırıcıların yoğunluk (kayaç tipine göre r: 0,63-0,89) ve sertlikleri (kayaç tipine göre r: 0,69-0,82) arasında yüksek-çok yüksek doğru orantılı ilişki tespit edilmiştir. Kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği birbiriyle bağlantılı olduğu için, kesme derinliği üzerinde etkili mekanizmalar aynı şekilde burada da etkili olmuştur.

3.1.4. Kayaç Özelliklerinin Kesme-Aşınma Derinliğine Etkileri

Kayaç tipine göre kesme-aşınma derinlikleri Şekil 3.13'te gösterilmektedir. Bu performans göstergesine göre kayaçlar iki grupta toplanabilir. Kesme derinliğinde olduğu gibi Tüf ve Limra türü kayaçlarda daha derin kesme-aşınma derinlikleri (aşındırıcı tipine göre h_a : 6,25-49,03 mm) elde edilmiştir. Diğer kayaçlarda kaydedilen kesme-aşınma derinlikleri ise daha düşüktür (aşındırıcı tipine göre h_a : 2,29-26,51 mm). Tablo 3.8'de ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleriyle kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır. Kesme-aşınma derinliğinin kayaç özellikleriyle ilişkisinin kesme derinliğiyle benzer bir eğilimde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13. Kayaç tipine göre kesme-aşınma derinlikleri

Tablo 3.8. Kesme-aşınma derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı cm ³ /50 cm ²	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,84	0,79	0,79	-0,73	-0,80	-0,82	-0,71	-0,69	-0,47	-0,50
AOK	0,86	0,89	0,89	-0,84	-0,80	-0,85	-0,72	-0,70	-0,57	-0,65
Zımpara	0,81	0,78	0,78	-0,72	-0,74	-0,77	-0,67	-0,66	-0,48	-0,52
Garnet	0,79	0,85	0,83	-0,74	-0,73	-0,79	-0,56	-0,59	-0,47	-0,64
Çelik	0,86	0,80	0,77	-0,71	-0,83	-0,88	-0,64	-0,64	-0,48	-0,57
Olivin	0,90	0,81	0,80	-0,77	-0,82	-0,83	-0,72	-0,73	-0,57	-0,60
Cam	0,87	0,79	0,80	-0,82	-0,77	-0,77	-0,80	-0,81	-0,66	-0,61
Plastik	0,84	0,85	0,86	-0,83	-0,76	-0,79	-0,74	-0,73	-0,58	-0,61

Kesme derinliğinde olduğu gibi kesme-aşınma derinliğinin, Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranıyla doğru orantılı; yoğunluk, sertlik, dayanım ve ultrasonik dalga hızıyla ters orantılı bir eğilimde olduğu görülmektedir. Literatürde kayaç özelliklerinin kesme derinliğine etkilerini irdeleyen çalışmalarda toplam kesme derinliği kullanılmış olup, kesme-aşınma derinliğiyle ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Ancak, kesme derinliğinin artmasıyla kesme-aşınma derinliğinin de artması bekleneneğinden (bu iki değer birbiriyle ilişkili olduğundan), kayaç özelliklerinin kesme derinliği üzerine olan etkisine yönelik geliştirilen ve/veya öne sürülen mekanizmaların, kesme-aşınma bölgesi için de geçerli olması beklenilebilir.

3.1.5. Kesme-Aşınma Derinliği/Kesme Derinliği Oranı

Elde edilen h_a/h_t oranları Tablo 3.9’da verilmiştir. h_a/h_t oranları 0,28-0,58 arasında değişmektedir. En düşük oran camın aşındırıcı olarak kullanıldığı lamprofir kesiminden, en yüksek oran ise AOB’un kullanıldığı lamprofir kesiminden elde edilmiştir. Yapılan analizlerde h_a/h_t oranları ile kayaç ve özellikleri arasında anlamlı bir ilişki bulunamamıştır. Buna rağmen aşındırıcılar içerisinde genel olarak garnet ve camın diğerlerinden daha düşük

oranlar verdiği görülmektedir. Benzer şekilde, Kaya (2016) garnet ve camın kullanıldığı mermer kesimlerinde diğer aşındırıcılara nazaran düşük h_a/h_t oranları elde etmiştir.

Tablo 3.9. Kesme-aşınma derinliği / kesme derinliği oranları

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,30	0,38	0,39	0,33	0,39	0,34	0,40	0,39
Lamprofir	0,43	0,58	0,45	0,45	0,47	0,45	0,28	0,51
Bazalt	0,42	0,43	0,41	0,46	0,51	0,43	0,37	0,50
Mermer	0,37	0,48	0,47	0,40	0,51	0,49	0,37	0,51
Traverten	0,30	0,37	0,36	0,39	0,45	0,41	0,41	0,46
Limra-1	0,32	0,46	0,41	0,32	0,44	0,53	0,39	0,50
Limra-2	0,35	0,32	0,38	0,38	0,39	0,38	0,33	0,38
Kayseri Tüf	0,36	0,32	0,37	0,38	0,38	0,37	0,36	0,41
Rize Tüf	0,36	0,37	0,37	0,41	0,38	0,35	0,32	0,33
Bayburt Tüf	0,36	0,42	0,43	0,38	0,42	0,42	0,41	0,42

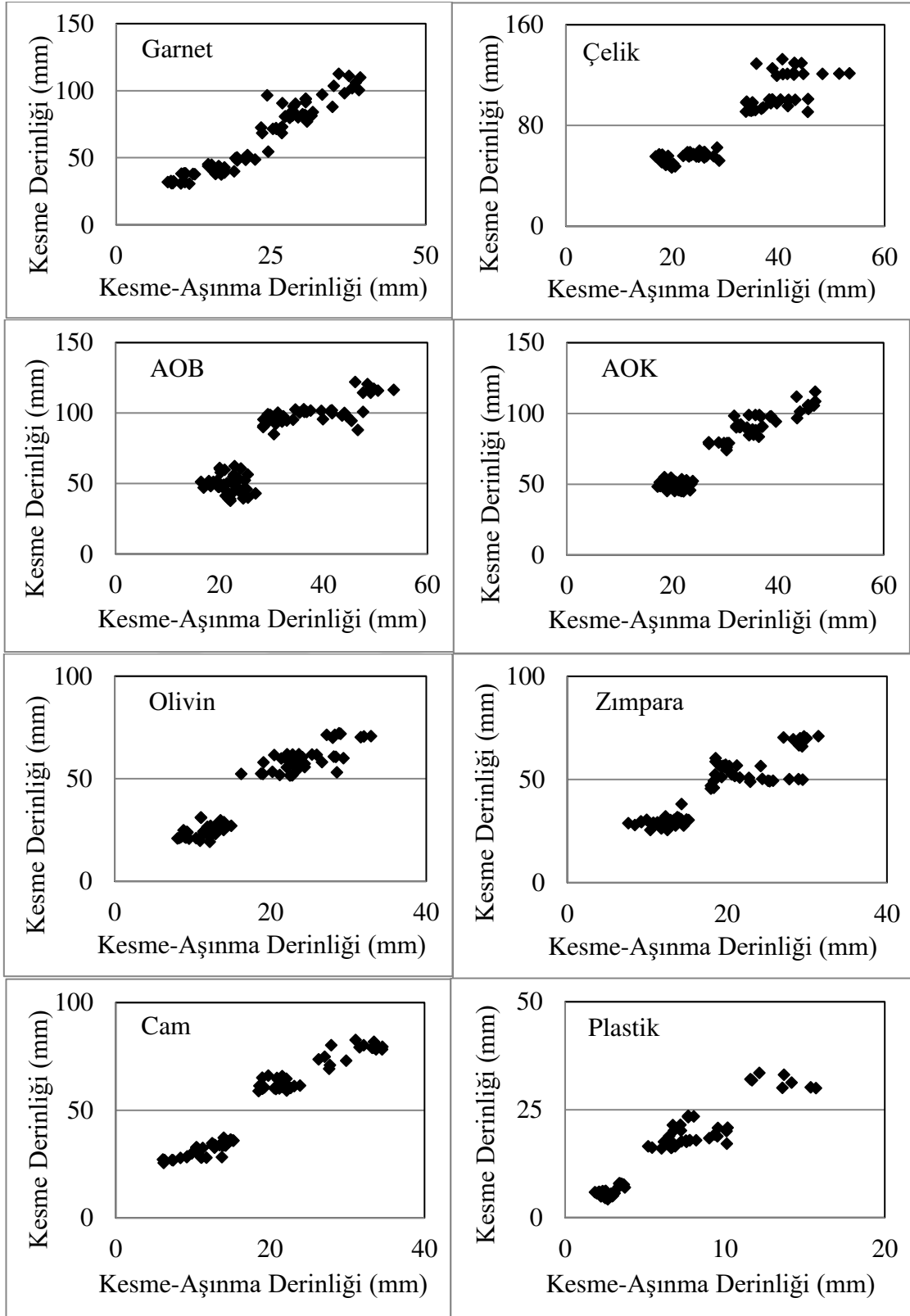
3.1.6. Kesme Derinliğinin Tahminine Yönelik Gerçekleştirilen Regresyon Analizleri

3.1.6.1. Kesme-Aşınma Derinliğine Bağlı Olarak Kesme Derinliğinin Tahmini

Şekil 3.14'te her aşındırıcı için kesme-aşınma derinliğine karşılık gelen kesme derinliklerinin dağılım grafiği görülmektedir. Tablo 3.10'da ise her aşındırıcı için kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyonlar verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, çok yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir. Şekil 3.14 ve Tablo 3.10 birlikte değerlendirildiğinde, veriler regresyon analizi için uygundur.

Tablo 3.10. Aşındırıcı tipine göre kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı	r
Garnet	0,96
AOB	0,88
AOK	0,95
Cam	0,96
Olivin	0,95
Zımpara	0,88
Çelik	0,92
Plastik	0,95



Şekil 3.14. Aşındırıcı tipine göre kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasındaki ilişki

Tablo 3.11. Kesme derinliğinin, kesme-aşınma derinliği kullanılarak tahminine yönelik her aşındırıcı grubu için geliştirilen modeller ($Y=$)

Aşındırıcı	Lineer	Üstel	Logaritmik	Polinomial	Üssel
Garnet	$2,7175X+1,9338$	$21,275e^x$	$53,082 \ln(X) - 97,532$	$0,0219X^2+1,7091X+11,827$	$3,8895X^{0,8938}$
AOB	$2,3397X+4,7395$	$27,234e^x$	$74,426 \ln(X) - 174,24$	$-0,0587 X^2+6,2783X-54,64$	$2,4117X^{1,0058}$
AOK	$2,4175X+2,2556$	$25,975e^x$	$71,153 \ln(X) - 163,89$	$-0,0388 X^2+4,8303X-31,93$	$2,5226X^{0,9956}$
Cam	$2,3183X+7,3468$	$19,497e^x$	$40,206 \ln(X) - 63,215$	$-0,0319 X^2+3,6243X-3,8938$	$4,4031X^{0,8356}$
Olivin	$2,4458X-1,6803$	$12,818e^x$	$41,828 \ln(X) - 75,069$	$-0,0370 X^2+3,8538X-13,163$	$1,9953X^{1,0518}$
Zımpara	$2,0555X+6,3432$	$17,372e^x$	$36,574 \ln(X) - 60,161$	$-0,0447 X^2+3,7990X-8,7956$	$3,6193X^{0,8574}$
Plastik	$2,3204X+0,2188$	$4,0407e^x$	$13,617 \ln(X) - 7,7155$	$0,0849 X^2+3,5870X-3,1734$	$2,0692X^{1,063}$
Çelik	$2,6452X+1,4071$	$27,349e^x$	$78,919 \ln(X) - 186,33$	$0,0066 X^2+3,0726 X-7,6599$	$2,6767 X^{0,9889}$

Y: Kesme derinliği, h_t (mm); X: Kesme-aşınma derinliği, h_a (mm)

Tablo 3.12. Regresyon modellerine ait determinasyon katsayıları (R^2)

Aşındırıcı	Lineer	Üstel	Logaritmik	Polinomial	Üssel
Garnet	0,92	0,91	0,84	0,92	0,89
AOB	0,77	0,71	0,79	0,80	0,74
AOK	0,90	0,87	0,91	0,91	0,89
Cam	0,91	0,88	0,88	0,92	0,89
Olivin	0,90	0,88	0,89	0,90	0,89
Zımpara	0,78	0,77	0,78	0,79	0,79
Plastik	0,90	0,84	0,90	0,92	0,93
Çelik	0,84	0,87	0,82	0,84	0,85

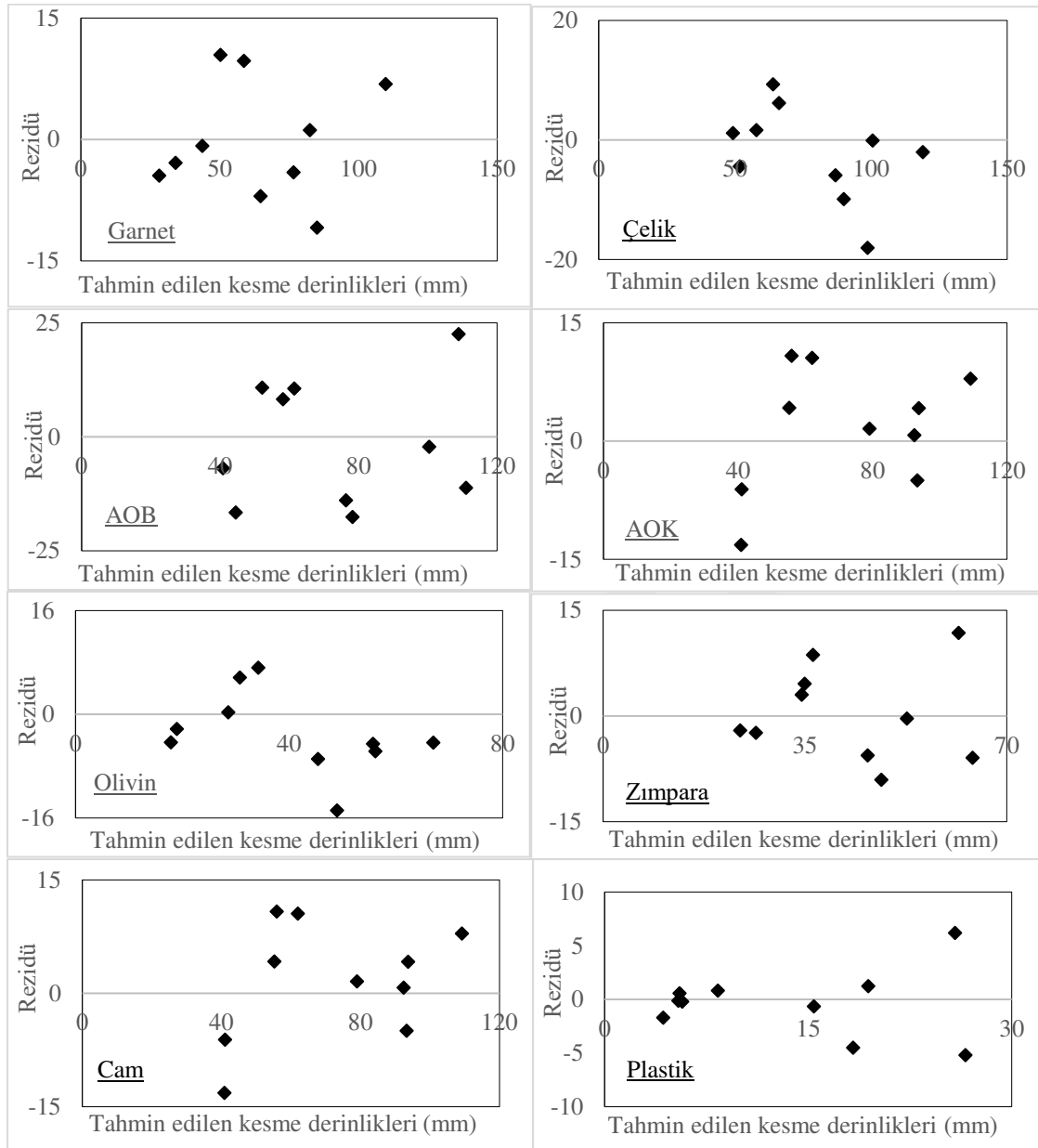
Çalışma kapsamında geliştirilen modeller (eşitlikler) Tablo 3.11’de, her eşitlik için elde edilen determinasyon katsayıları ise Tablo 3.12’de verilmektedir. Yüksek R^2 değerleri, kesme derinliğindeki değişimin açıklanamayan kısmının düşük olmasına işaret eder. Bu da kesme derinliği ile kesme-aşınma derinliği arasında daha kuvvetli bir ilişki olduğu anlamına

gelir. Geliştirilen modellerin elde edilen performans ölçütleri değerleri ise Tablo 3.13'te verilmiştir.

Tablo 3.13. Modellerin tahmin performans ölçütleri

Aşındırıcı	Hata Tipi	Lineer	Üstel	Logaritmik	Polinomial	Üssel
Garnet	MAPE	%11	%10	%17	%10	%11
	MAE	5,86	6,45	8,04	5,83	5,81
	RMSE	7,05	8,07	10,11	6,82	7,38
AOB	MAPE	%17	%17	%18	%18	%17
	MAE	12,16	12,54	12,31	12,05	12,27
	RMSE	14,12	15,61	13,47	13,26	14,45
AOK	MAPE	%10	%10	%12	%11	%10
	MAE	6,23	6,94	6,76	6,43	6,31
	RMSE	7,53	9,45	8,01	7,52	7,62
Cam	MAPE	%11	%12	%13	%10	%11
	MAE	5,19	6,85	4,63	4,52	4,92
	RMSE	5,77	9,29	5,68	4,87	5,45
Olivin	MAPE	%12	%13	%17	%14	%13
	MAE	5,55	6,34	6,29	5,62	5,80
	RMSE	7,20	8,95	7,02	6,70	7,48
Zımpara	MAPE	%12	%12	%14	%13	%12
	MAE	5,26	5,45	5,63	5,34	5,34
	RMSE	6,64	7,41	6,46	6,34	6,57
Plastik	MAPE	%15	%18	%17	%13	%13
	MAE	2,26	2,91	2,38	2,12	2,14
	RMSE	3,20	4,07	3,13	3,02	3,22
Çelik	MAPE	%9	%7	%11	%17	%9
	MAE	6,04	5,88	7,80	13,25	6,49
	RMSE	7,84	7,84	9,14	15,50	8,03

Tablo 3.13 incelendiğinde geliştirilen modellerin çelik için iyi-yüksek, diğer aşındırıcı tipleri için iyi doğrulukta tahmin sağladığı (aşındırıcı tipine göre: MAPE=%7-18) görülmektedir. Tablo 3.12-3.13 birlikte değerlendirildiğinde (en yüksek R^2 ve en düşük RMSE) çelik için üstel, diğer tüm aşındırıcılar için ise polinomial fonksiyonlu modellerin önerilmesinin uygun olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Şekil 3. 15'te kesme-aşınma derinliklerine bağlı olarak tahmin edilen kesme derinlikleri için rezidü grafikleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, her bir aşındırıcı için kesme derinliğinin tahminine yönelik önerilen modellerin rezidüleri sıfır doğrusu boyunca rastgele dizilmiştir. Bu da modellerin doğruluğuna işaret eder



Şekil 3.15. Kesme-aşınma derinliklerine bağlı olarak tahmin edilen kesme derinlikleri için rezidü grafikleri

3.1.6.2. Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Bağlı Olarak Kesme Derinliğinin Tahmini

Tablo 3.14'te her aşındırıcı için kesme derinliğinin kayaç özelliklerine bağlı tahminini sağlayan modellere ait sonuçlar verilmektedir.

Tablo 3.14. Kesme derinliğinin kayaç özelliklerine bağlı olarak tahmini için gerçekleştirilen tek değişkenli regresyon analizlerine ait sonuçlar

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
Garnet	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	4,3988 3,1086	13,038 0,644	14,042	0,337 4,827	1,833	23,302	5,12	0,7444	Y=3,1086X+4,3988
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	33,4183 3,4042	9,230 0,866	16,225	3,620 3,930		15,446		0,6588	Y=3,4042X+33,4183
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	39,2496 5,5903	8,326 1,482	16,660	4,714 3,773		14,236		0,6402	Y=5,5903X+39,2496
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	238,9443 -2,5271	42,565 0,609	15,648	5,614 -4,148		17,207		0,6826	Y=238,9443-2,5271X
AOB	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	4,0335 3,7446	7,590 0,375	8,174	0,531 9,989	1,833	99,770	5,12	0,9258	Y=3,7446X+4,0335
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	41,9257 3,7692	9,470 0,889	16,646	4,427 4,242		17,991		0,6922	Y=3,7692X+41,9257
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	48,4896 6,1651	8,648 1,539	17,305	5,607 4,006		16,049		0,6673	Y=6,1651X+48,4896
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	271,1123 -85,5809	43,962 19,088	16,008	6,167 -4,484		20,102		0,7153	Y=271,1123-85,5809X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	246,7718 -3,2363	36,413 0,681	15,348	6,777 -4,751		22,572		0,7383	Y=246,7718-3,2363X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	279,0451 -2,9358	37,438 0,536	13,763	7,454 -5,479		30,018		0,7896	Y=279,0451-2,9358X
	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	Sabit σ_c	152,2614 -1,1733	17,608 0,257	15,821	8,647 -4,558		20,772		0,7220	Y=152,2614-1,1733X

Tablo 3.14'ün devamı

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
AOK	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	13,7862 3,0153	8,770 0,433	9,444	1,572 6,961	1,833	48,460	5,12	0,8583	Y=3,0153X+13,7862
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	41,9536 3,2998	7,014 0,658	12,329	5,981 5,013		25,135		0,7586	Y=3,2998X+41,9536
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	47,9000 5,3512	6,648 1,183	13,303	7,205 4,523		20,461		0,7189	Y=5,3512X+47,9
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	236,3736 -72,2025	35,934 15,602	13,085	6,578 -4,628		21,416		0,8533	Y=236,3736-72,2025X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	211,2268 -2,6433	32,371 0,6056	13,644	6,525 -4,365		19,054		0,7043	Y=211,2268-2,6433X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	240,3094 -2,4371	32,156 0,460	11,821	7,473 -5,295		28,042		0,7780	Y=240,3094-2,4371X
Olivin	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	-5,5494 2,5230	6,277 0,310	6,761	-0,884 8,138	1,833	66,219	5,12	0,8922	Y=2,5230X-5,5494
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	19,4712 2,5972	6,441 0,604	11,322	3,023 4,297		18,465		0,6977	Y=2,5972X+19,4712
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	24,0831 4,2276	5,946 1,058	11,897	4,051 3,996		15,966		0,6662	Y=4,2276X+24,0831
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	174,3221 -57,6275	31,559 13,702	11,491	5,5237 -4,2057		17,688		0,6886	Y=174,3221-57,6275X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	158,3350 -2,1868	26,051 0,487	10,980	6,078 -4,487		20,137		0,7157	Y=158,3350-2,1868X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	180,8709 -1,9943	26,660 0,381	9,444	6,784 -5,226		27,315		0,7735	Y=180,8709-1,9943X

Tablo 3.14'ün devamı

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
Zımpara	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	7,2491 1,8644	6,566 0,324	7,072	1,104 5,749	1,833	66,219	5,12	0,8051	Y=1,8644X+7,2491
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	23,2296 2,2024	3,7675 0,3535	6,622	6,166 6,230		38,808		0,8291	Y=2,2024X+23,2296
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	26,9716 3,6238	3,500 0,623	7,003	7,706 5,818		33,854		0,8089	Y=3,6238X+26,9716
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	151,4199 -47,5031	20,952 9,097	7,629	7,227 -5,222		27,267		0,7732	Y=151,4199-47,5053X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	128,5523 -1,6197	22,522 0,4213	9,493	5,708 -3,844		14,780		0,6488	Y=128,5523-1,6197X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	148,8271 -1,5287	21,740 0,311	7,992	6,846 -4,913		24,139		0,7511	Y=148,8271-1,5287X
Cam	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	0,5944 2,5915	6,800 0,336	7,324	0,087 7,716	1,833	59,544	5,12	0,8815	Y=2,5915X+0,5944
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	27,7621 2,5020	7,560 0,713	13,350	3,655 3,511		12,324		0,6064	Y=2,5020X+27,7621
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	180,3544 -57,0092	35,492 15,410	12,924	5,082 -3,699		13,686		0,6311	Y=180,3544-57,0092X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	171,2300 -2,2897	25,999 0,486	10,959	6,586 -4,708		22,162		0,7348	Y=171,23-2,2897X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	192,1002 -2,0488	28,088 0,402	10,326	6,839 -5,096		25,972		0,7645	Y=192,1002-2,0488X
	Tek Eksenli Basma Dayanımı (MPa)	Sabit σ_c	104,3686 -0,8302	12,563 0,184	7,072	8,307 -4,520		20,428		0,7186	Y=104,3686-0,8302X

Tablo 3.14'ün devamı

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
Plastik	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	-7,8737 1,1302	4,015 0,198	4,324	-1,961 5,700	1,833	32,487	5,12	0,8024	Y=1,1302X+7,8737
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	2,2203 1,2892	2,651 0,249	4,660	0,838 5,182		26,855		0,7705	Y=1,2892X+2,2203
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	4,2092 2,1676	2,255 0,401	4,511	1,867 5,403		29,188		0,7849	Y=2,1676X+4,2092
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	79,5429 -28,8052	12,782 5,550	4,654	6,223 -5,190		26,941		0,7710	Y=79,5429-28,8052X
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	67,8666 -1,0235	12,584 0,235	5,304	5,393 -4,348		18,904		0,7026	Y=67,8666-1,0235X
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	78,8795 -0,9401	12,680 0,1815	4,661	6,221 -5,180		26,833		0,7703	Y=78,8795-0,9401X
Çelik	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	13,7573 0,6797	13,761 0,680	14,821	1,000 5,230	1,833	37,353	5,12	0,7737	Y=0,6797X+13,7573
	Schmidt sertliği (Klasik)	Sabit R	251,5663 -3,2115	42,188 0,789	17,782	5,963 -4,069		16,559		0,6742	Y=251,6553-3,2115
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	282,7408 -2,9010	45,244 0,648	16,633	6,249 -4,480		20,070		0,7150	Y=282,7408-2,9010X

Y: Kesme derinliği, h_t (mm); X: İlgili kayaç özelliği

Tablo 3.14 incelendiğinde, bağımsız değişkenlerin katsayılarına ait tüm t ve F mutlak değerlerinin t-tablo ve F-tablo değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu da geliştirilen modellerin F ve t testi açısından geçerli olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, denklemler %95 güven seviyesinde anlamlıdır. Determinasyon katsayıları daha yüksek modellerin tahmin performansı daha yüksektir.

3.2. Malzeme Uzaklaştırma Oranı

Her bir aşındırıcı tipiyle kesilen numunelerden uzaklaştırılan malzeme oranları Tablo 3.15'te verilmektedir. Malzeme uzaklaştırma oranlarının geniş bir aralıkta değiştiği görülmektedir. En düşük değer 2,29 mm³/sn ile plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı mermer kesiminden elde edilmiştir. En yüksek değer ise 102,27 mm³/sn ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı Limra-1'de görülmüştür. Kesme derinliklerinin geniş bir aralıkta değişmesi, malzeme uzaklaştırma oranlarının da farklı olmasının ana nedenlerindendir. Zira daha derin kesimlerde daha fazla malzeme uzaklaştırılacaktır.

Tablo 3.15. Malzeme uzaklaştırma oranları, V_m (mm³/sn)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	12,93	28,31	24,52	25,05	15,18	8,89	24,85	3,61
Lamprofir	14,95	19,26	22,73	43,68	11,96	14,77	10,93	5,75
Bazalt	20,65	21,30	18,15	58,18	19,24	14,37	16,84	4,95
Mermer	19,25	21,69	21,25	39,08	11,44	14,48	17,04	2,29
Traverten	10,04	22,38	23,63	42,99	18,96	11,03	23,06	3,50
Limra-1	26,26	43,34	32,63	102,27	38,08	29,96	69,84	12,00
Limra-2	23,29	28,98	30,36	76,84	19,32	19,43	32,44	6,27
Kayseri Tüf	34,70	32,70	44,25	89,81	29,63	23,71	38,85	10,96
Rize Tüf	35,29	33,87	40,52	67,01	31,83	25,89	37,99	9,36
Bayburt Tüf	41,01	49,27	48,20	73,68	31,17	27,15	48,33	16,70

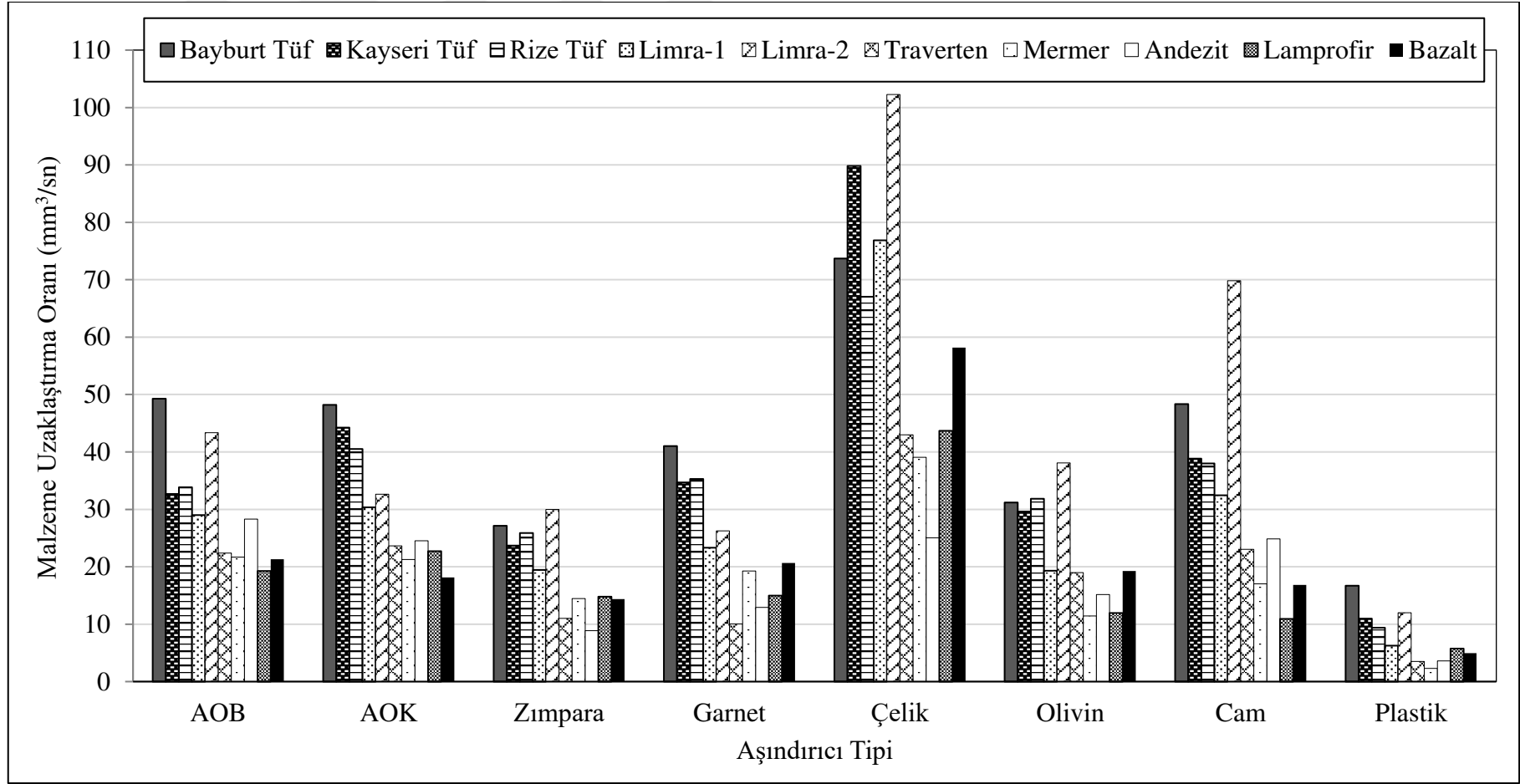
3.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Malzeme Uzaklaştırma Oranına Etkileri

Malzeme uzaklaştırma oranı temelinde aşındırıcıların performans değerlendirilmesi Şekil 3.16'da görülmektedir. Malzeme uzaklaştırma oranı temelinde en iyi performansı çelik göstermiştir (25,05-102,27 mm³/sn). Ardından cam gelmektedir (10,93-69,84 mm³/sn). Alüminyum oksitler (18,15-49,27 mm³/sn), garnet (10,04-41,01 mm³/sn), olivin (11,96-

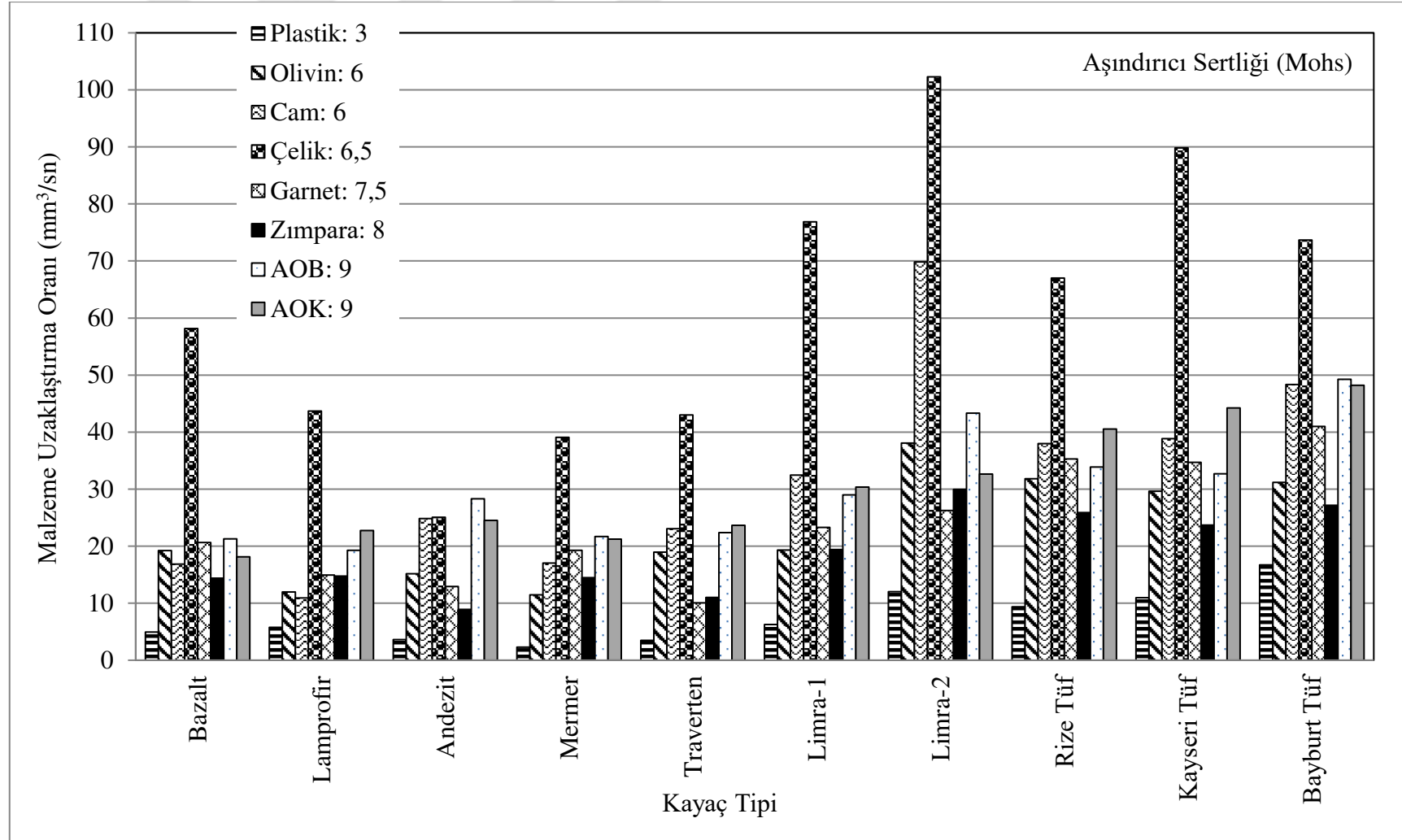
38,08 mm³/sn) ve zımpara (8,89-29,96 mm³/sn) onları takip etmektedir. Plastik ise çok düşük değerler (2,29-16,70 mm³/sn) elde edilmiştir. Camın, kesme derinliklerinde ortalarda yer almasına rağmen malzeme uzaklaştırma oranında daha yüksek performans göstermesi dikkat çekicidir. Burada göze çarpan başka bir durum da tane şekli küresel olan aşındırıcıların (çelik ve cam) daha yüksek performans göstermesidir. Şekil 3.16'da aşındırıcıların sertliğine, Şekil 3.18'de ise yoğunluğuna göre malzeme uzaklaştırma oranları grafikleri verilmiştir. Tablo 3.16'da da aşındırıcı özellikleri ile malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki korelasyonlar verilmektedir. İlgili tablo ve şekiller incelendiğinde, genel olarak daha yüksek yoğunluğa sahip aşındırıcılarla daha yüksek malzeme uzaklaştırma oranları elde edildiği görülmektedir. Malzeme uzaklaştırma oranları ile aşındırıcıların yoğunlukları arasında yüksek-çok yüksek (istisna 1 adet orta hariç) ve doğru orantılı ilişkiler tespit edilmiştir (kayaç tipine göre r: 0,70-0,94). Kesme derinliğinde irdelendiği gibi, düşük yoğunluklu aşındırıcılar için, su ve aşındırıcı tanelerin hızındaki azalmaya bağlı olarak jetin kinetik enerjisi düşmektedir. Ayrıca, aşındırıcı tanelerin darbe kuvvetleri de azalmaktadır. Dolayısıyla, kesilip uzaklaştırılan malzeme miktarında da azalmalar meydana gelmektedir. Aşındırıcıların artan sertliğine göre malzeme uzaklaştırma oranı artma eğilimi gösterse de buradaki ilişki zayıftır (kayaç tipine göre r: 0,08-0,58). Dolayısıyla, malzeme uzaklaştırma oranını etkileyen en önemli aşındırıcı özelliklerinin yoğunluk ve tane şekli olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 3.16. Malzeme uzaklaştırma oranı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

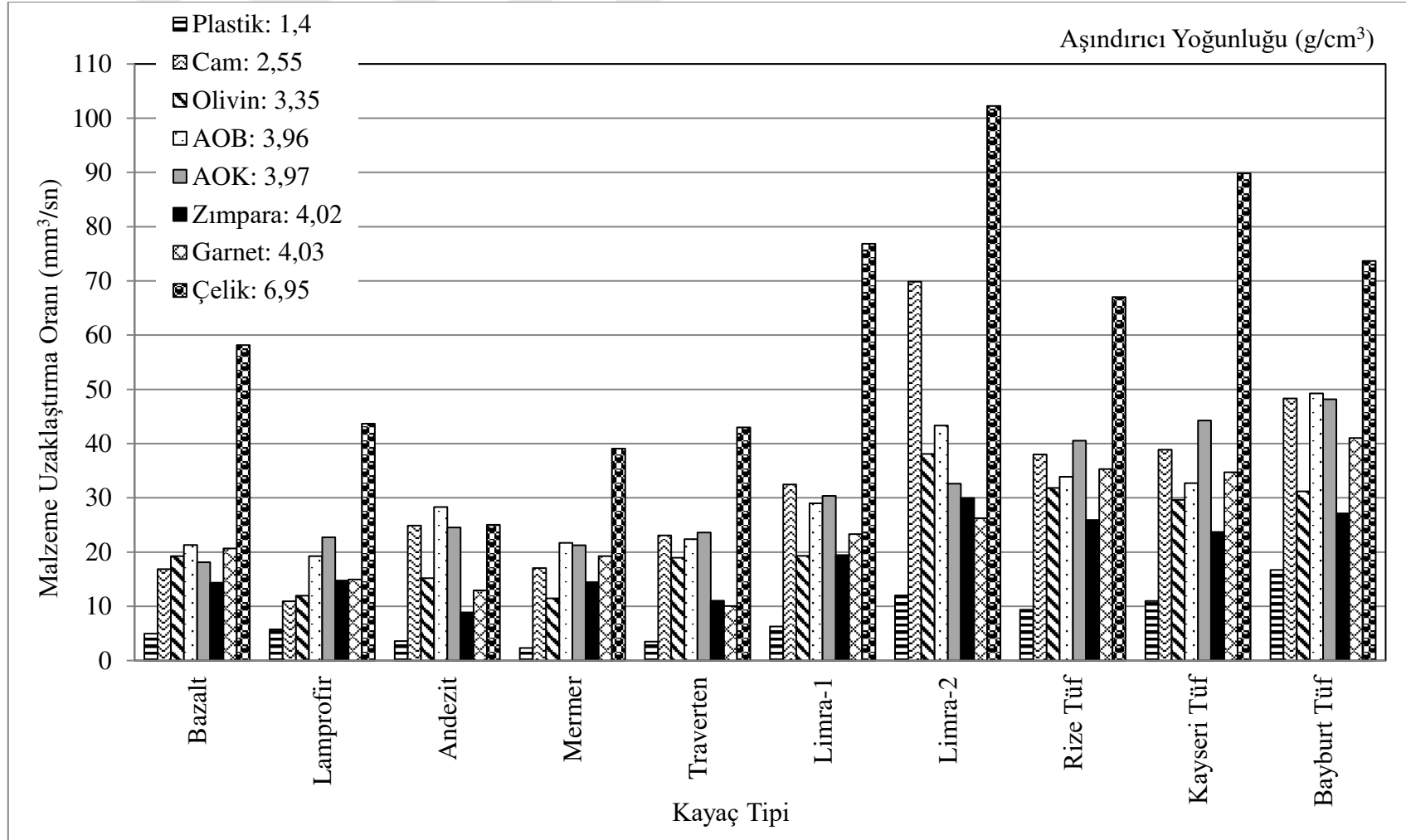
Aşındırıcı Özelligi	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	0,19	0,35	0,58	0,49	0,30	0,22	0,08	0,39	0,24	0,42
Yoğunluk (g/cm ³)	0,92	0,94	0,49	0,93	0,79	0,88	0,70	0,89	0,88	0,81



Şekil 3.16. Aşındırıcı tipine göre malzeme uzaklaştırma oranları



Şekil 3.17. Aşındırıcı sertliğine göre malzeme uzaklaştırma oranları



Şekil 3.18. Aşındırıcı yoğunluğuna göre malzeme uzaklaştırma oranları

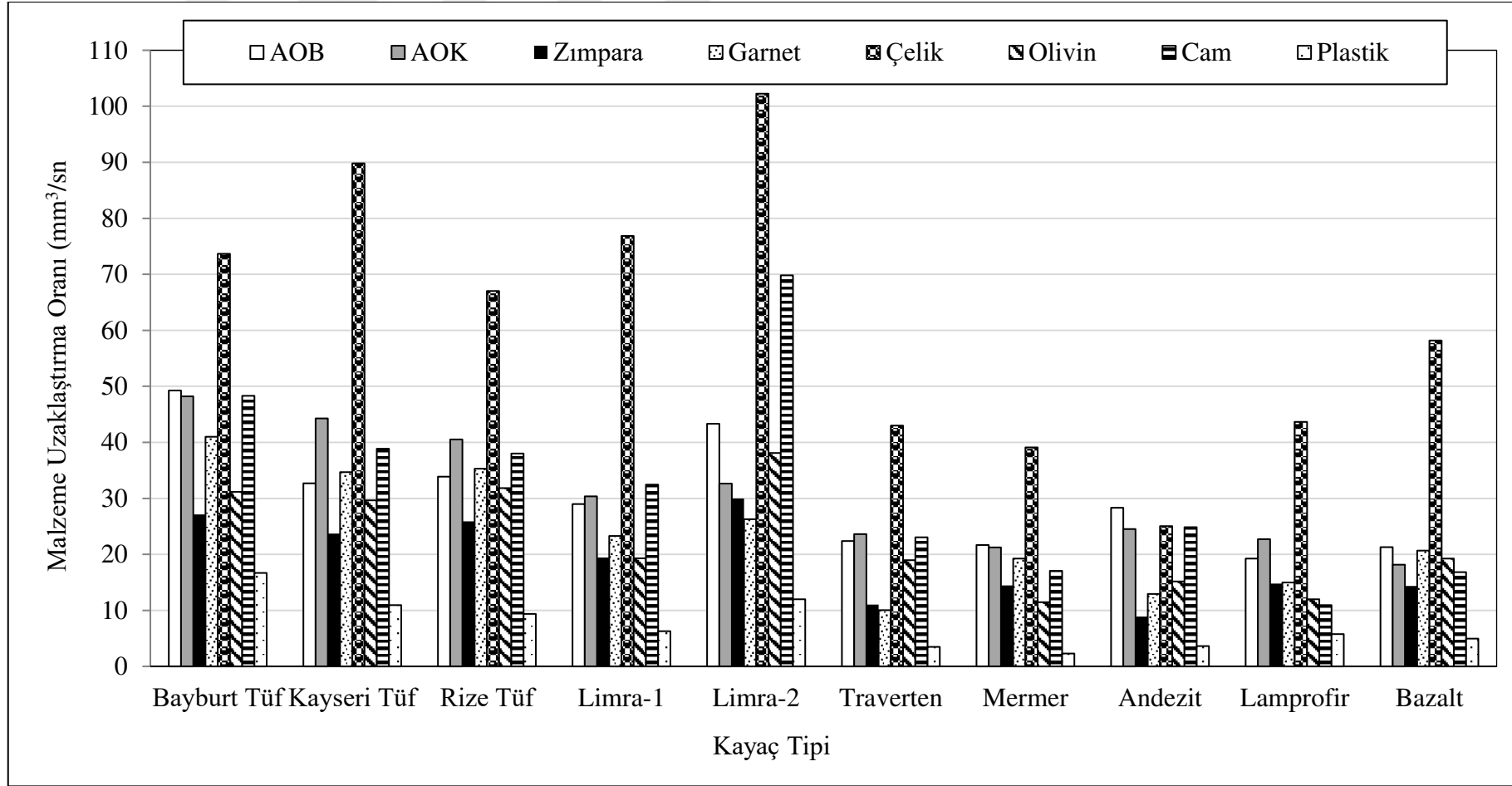
3.2.2. Kayaç Özelliklerinin Malzeme Uzaklaştırma Oranına Etkileri

Kayaç tipine göre malzeme uzaklaştırma oranları Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Kesme derinliklerine benzer şekilde, burada da 10 kayacı iki gruba ayırmak mümkündür. Tüf ve Limra türü kayaçlarda birim zamanda daha fazla malzeme uzaklaştırılırken (aşındırıcı tipine göre V_m : 6,27-102,27 mm³/sn), diğerlerinde malzeme uzaklaştırma oranları daha düşüktür (aşındırıcı tipine göre V_m : 2,29-58,18 mm³/sn). Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri temelinde malzeme uzaklaştırma oranları ise Şekil 3.20-3.26’da verilmektedir. Tablo 3.17’de ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleriyle malzeme uzaklaştırma oranı arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

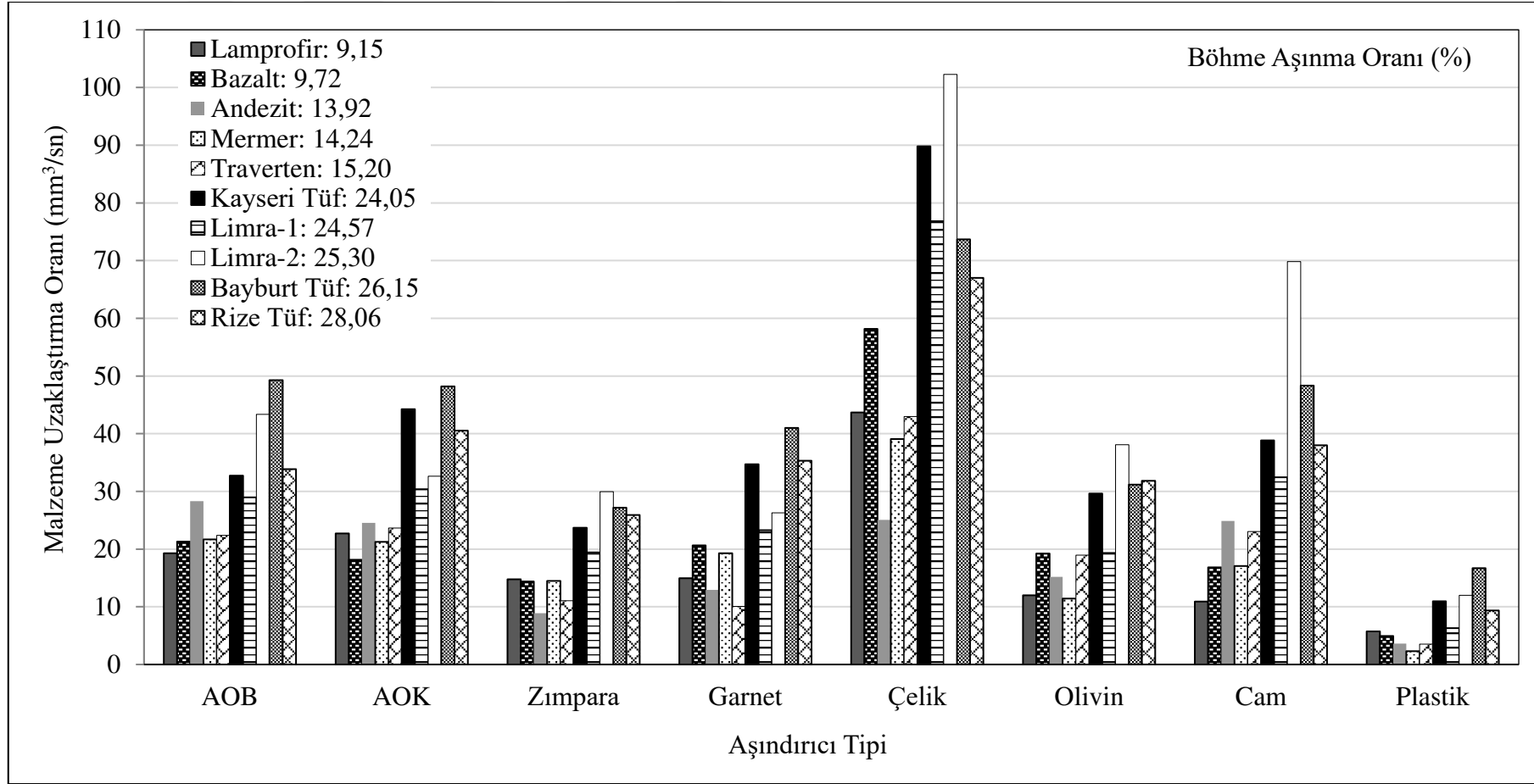
Tablo 3.17. Malzeme uzaklaştırma oranı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,81	0,84	0,84	-0,84	-0,74	-0,74	-0,75	-0,77	-0,62	-0,65
AOK	0,86	0,93	0,92	-0,94	-0,69	-0,77	-0,76	-0,75	-0,74	-0,81
Zımpara	0,84	0,73	0,69	-0,63	-0,77	-0,80	-0,62	-0,62	-0,43	-0,50
Garnet	0,80	0,88	0,87	-0,81	-0,72	-0,78	-0,60	-0,63	-0,56	-0,72
Çelik	0,74	0,57	0,50	-0,49	-0,59	-0,60	-0,49	-0,50	-0,40	-0,45
Olivin	0,82	0,73	0,68	-0,69	-0,74	-0,71	-0,59	-0,60	-0,46	-0,60
Cam	0,81	0,62	0,58	-0,61	-0,71	-0,67	-0,70	-0,72	-0,53	-0,46
Plastik	0,74	0,92	0,91	-0,86	-0,63	-0,68	-0,58	-0,57	-0,48	-0,71

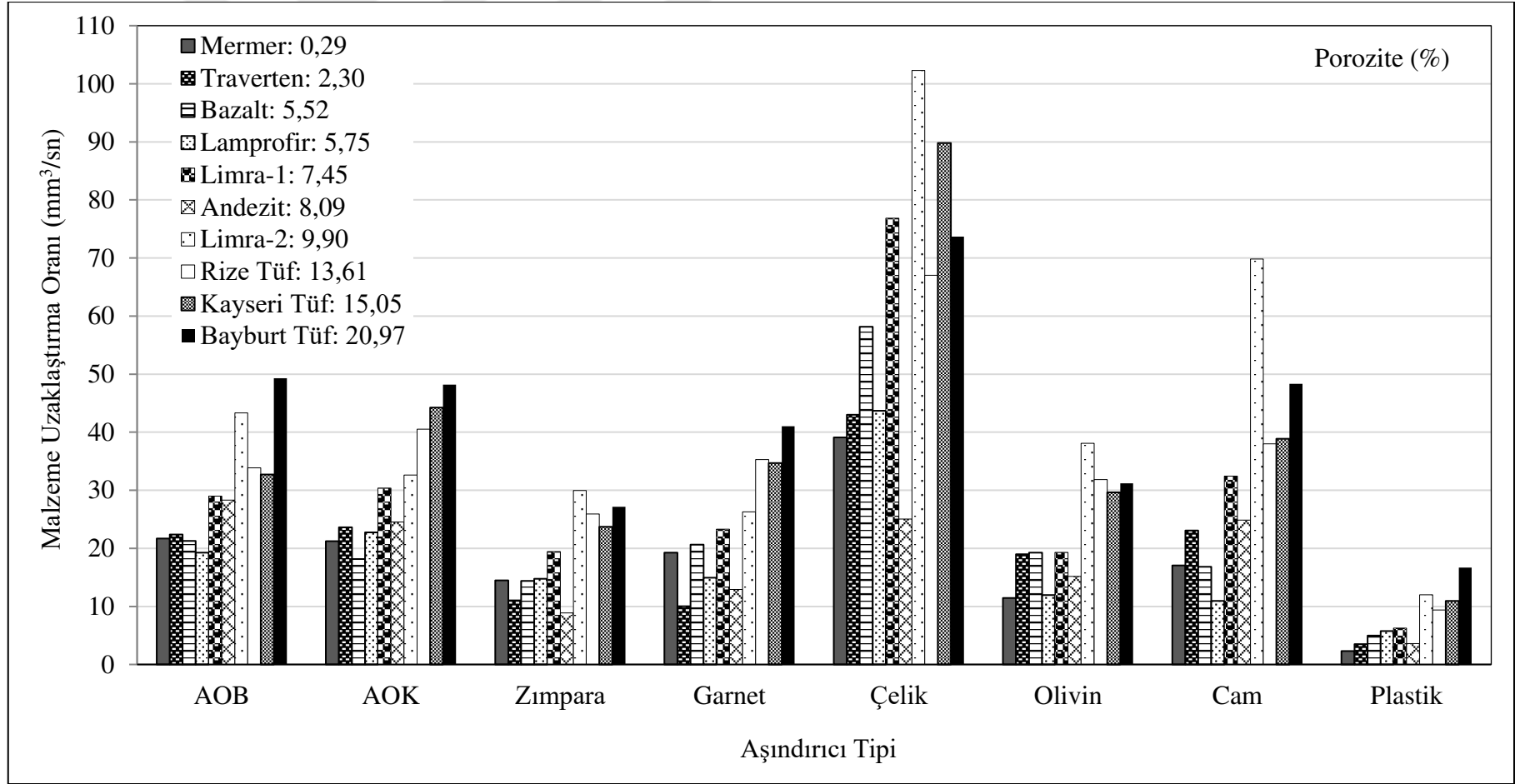
Kesme derinliğinde olduğu gibi, malzeme uzaklaştırma oranında da kayaçların Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranlarıyla doğru orantılı; yoğunluk, sertlik, dayanım ve ultrasonik dalga hızıyla ise ters orantılı bir eğilim olduğu görülmektedir.



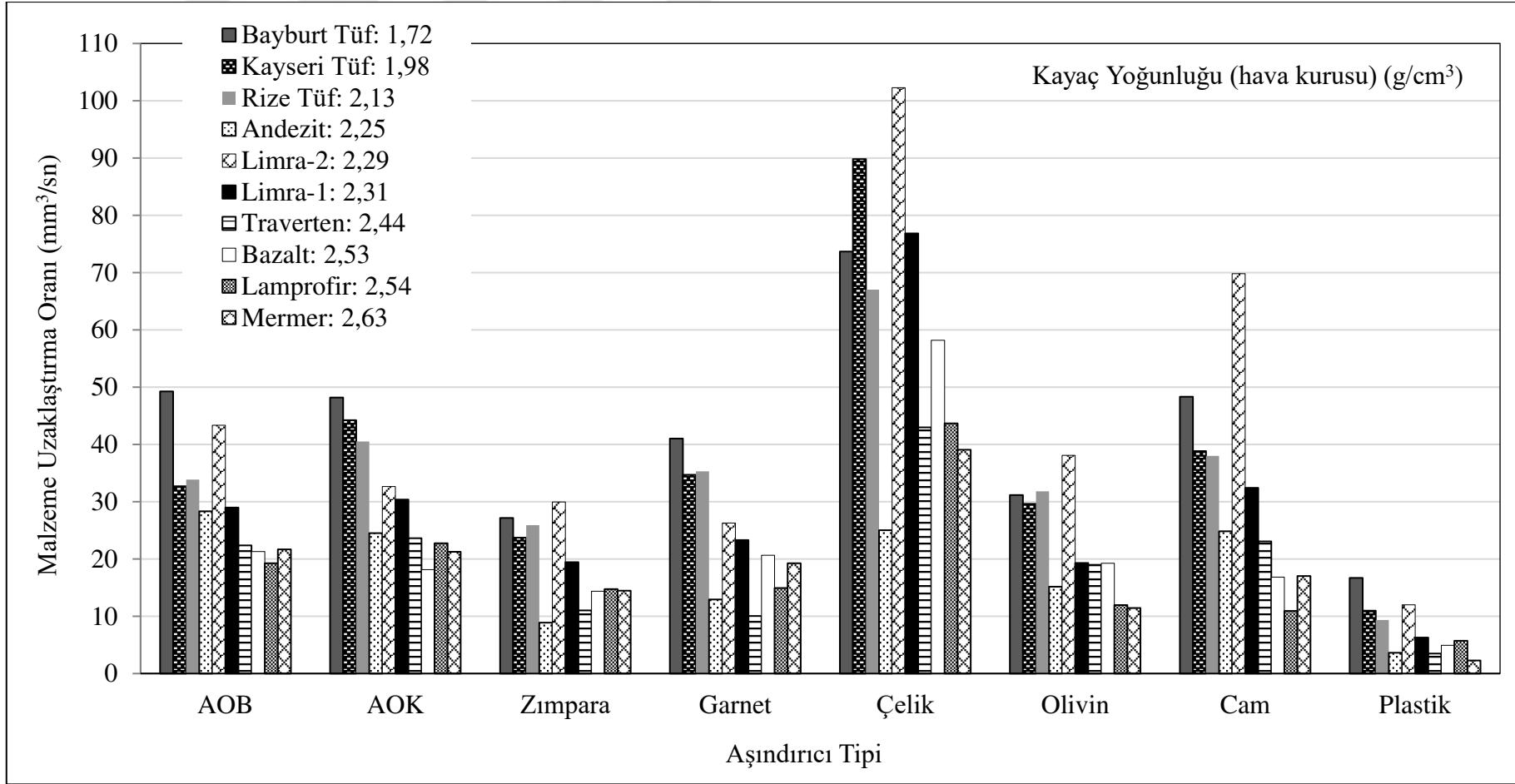
Şekil 3.19. Kayaç tipine göre malzeme uzaklaştırma oranları



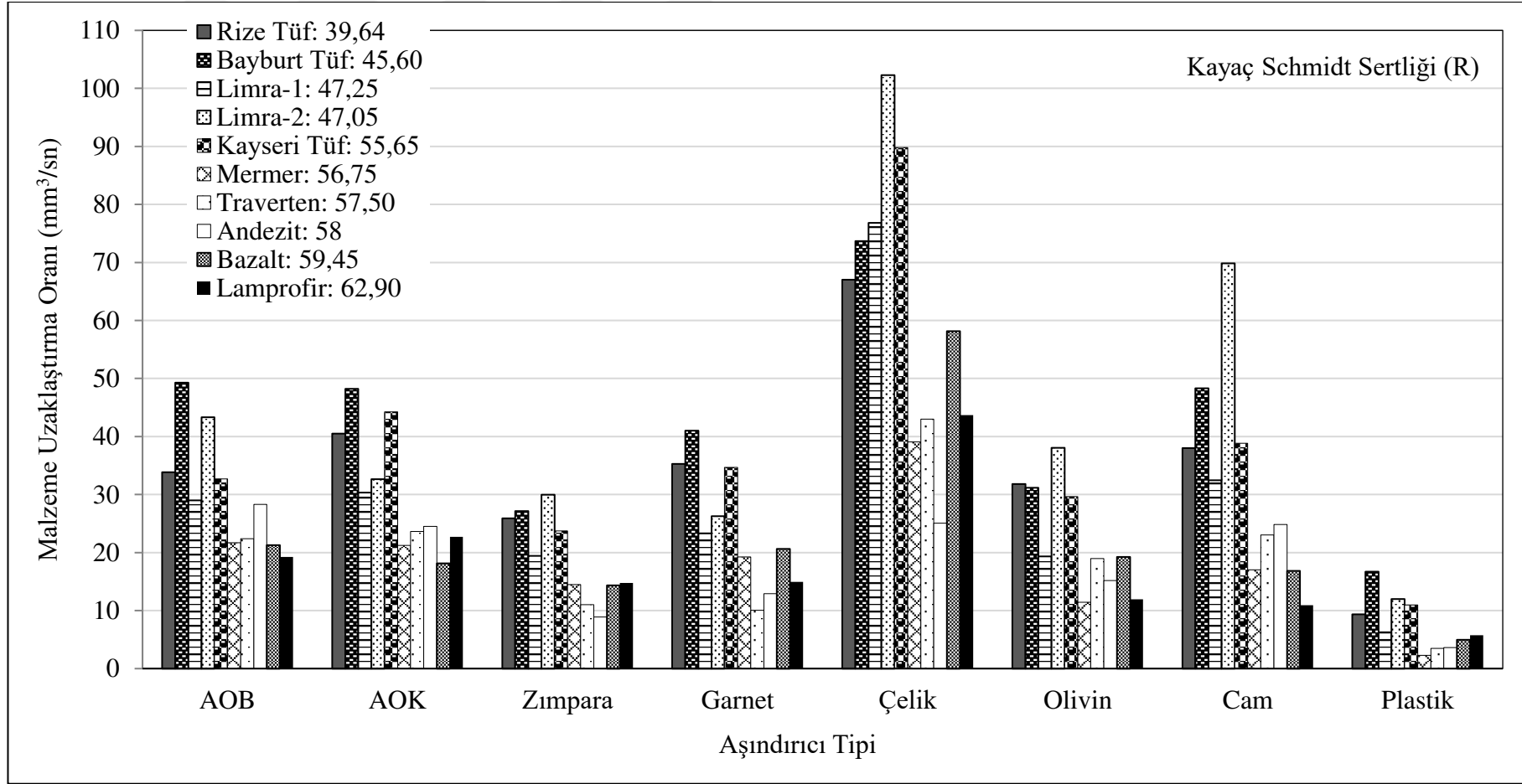
Şekil 3.20. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre malzeme uzaklaştırma oranları



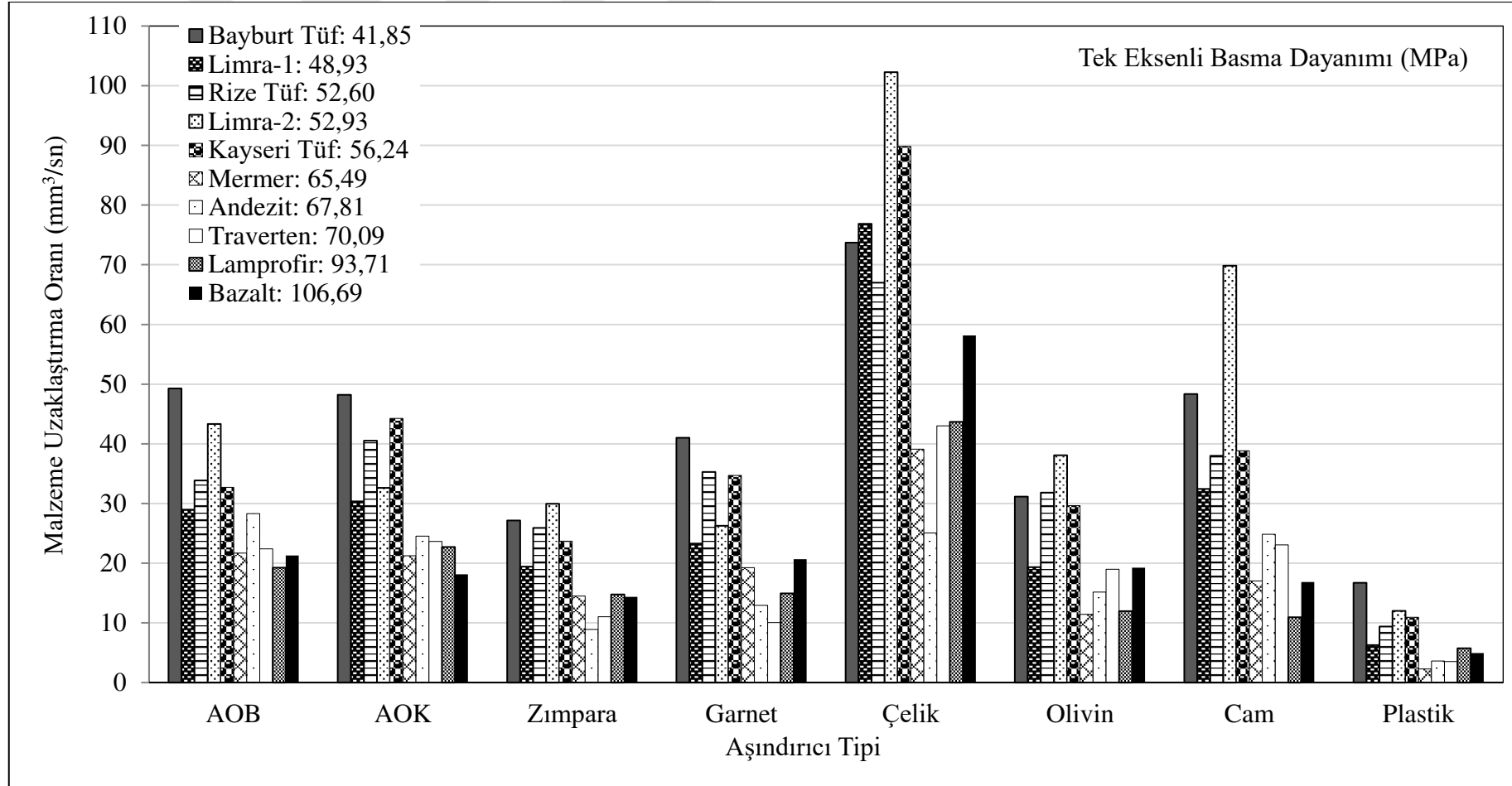
Şekil 3.21. Kayaçların porozitelerine göre malzeme uzaklaştırma oranları



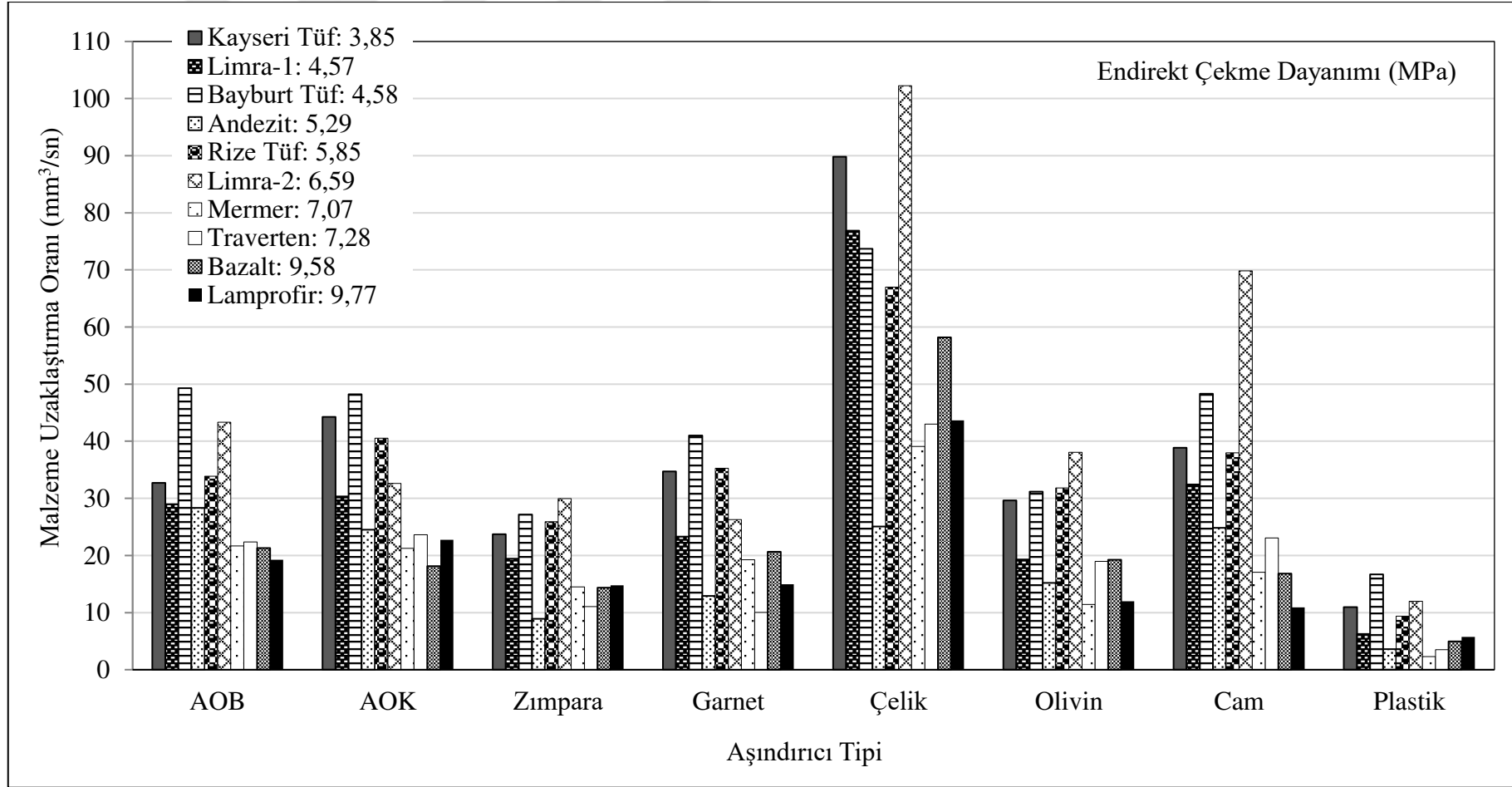
Şekil 3.22. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre malzeme uzaklaştırma oranları



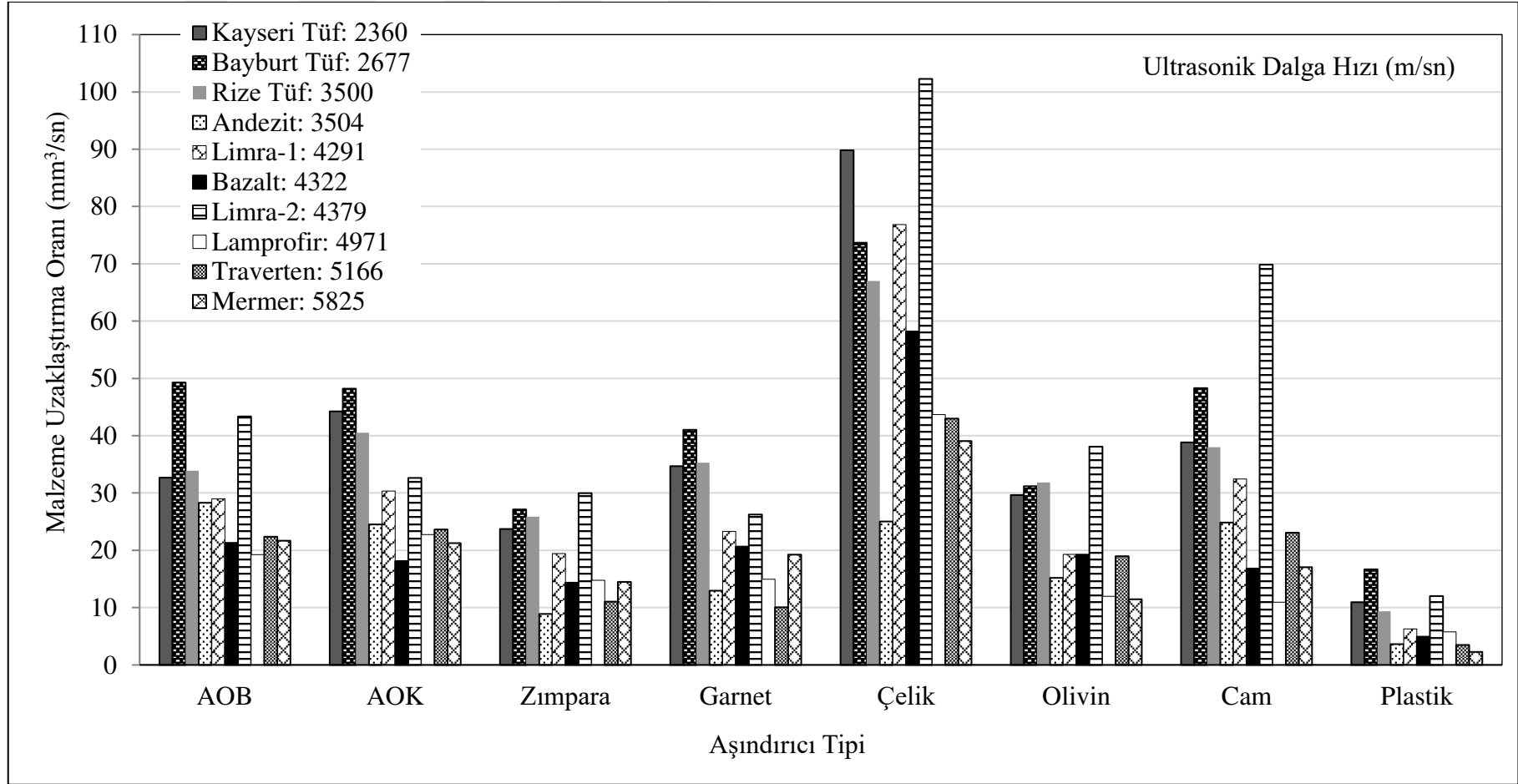
Şekil 3.23. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre malzeme uzaklaştırma oranları



Şekil 3.24. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre malzeme uzaklaştırma oranları



Şekil 3.25. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre malzeme uzaklaştırma oranları



Şekil 3.26. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre malzeme uzaklaştırma oranları

Kesme derinlikleri bölümünde bahsedilen fiziksel mekanizmalar malzeme uzaklaştırma oranı için de geçerlidir. Çünkü kesme derinliğini arttıran her olgu daha fazla malzemenin kesilmesi anlamına geleceğinden malzeme uzaklaştırma oranını da arttıracaktır. Malzeme uzaklaştırma oranı, kesme derinliğine sıkı sıkıya bağlıdır. Literatürde de genellikle performans ölçütü olarak kesme derinliği kullanıldığı için ASJ ile kayaç kesmede kayaç özelliklerinin malzeme uzaklaştırma oranı üzerindeki etkisini irdeleyen çalışma sayısı sınırlıdır. Bu çalışmadaki bulgular, literatürle de örtüşmektedir (Agus vd., 1993; Miranda vd.; 1993; Pi, 2008)

Malzeme uzaklaştırma oranı önemli bir kesme performans göstergesidir. Ancak performans değerlendirmelerinde tek başına kullanılması bazı olumsuzluklara yol açabilir. Çünkü bu gösterge hacimsel bir değer ifade etmektedir. Yalnızca malzeme uzaklaştırma oranı değerlendirilmiş olsa idi bu çalışmada camın ASJ ile kayaç kesmede aşındırıcı olarak çok yüksek performansla kullanabileceği düşünülebilirdi. Malzeme uzaklaştırma oranı, kesme derinliğiyle ilişkili olmasına rağmen yarığın üç boyutlu olduğu düşünüldüğünde kesme genişliklerinin de hesaba katılması gerekecektir. Örneğin; kesme genişliği yüksek-derinliği düşük bir kesimle, genişliği düşük-derinliği yüksek bir kesim aynı malzeme uzaklaştırma oranı değeri verebilir. İlkiyle (geniş ve sık yarık) düşük kesme performansı elde edilmişken ikincisiyle (dar ve derin yarık) iyi bir kesme performansı sağlanmıştır. Malzeme uzaklaştırma oranı referans alınarak yapılacak değerlendirmelerde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2.3. Kayaçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Bağlı Olarak Malzeme Uzaklaştırma Oranının Tahmini

Tablo 3.18’de her aşındırıcı tipi için ilgili kayaç özelliklerine bağlı olarak malzeme uzaklaştırma oranının tahminine yönelik geliştirilen modellere ait sonuçlar verilmiştir. Tablo incelendiğinde, bağımsız değişkenlerin katsayılarına ait tüm t ve F mutlak değerlerinin t-tablo ve F-tablo değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Bu da geliştirilen modellerin F ve t testi açısından geçerli olduğuna işaret etmektedir. Dolayısıyla, geliştirilen denklemlerin %95 güven seviyesinde anlamlı olduğu söylenebilir. Determinasyon katsayıları daha yüksek modellerin tahmin performansı daha yüksektir.

Tablo 3.18. Malzeme uzaklaştırma oranının kayaç özelliklerine bağlı olarak tahmini için gerçekleştirilen tek değişkenli regresyon analizlerine ait sonuçlar

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
Garnet	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	2,2872 1,1321	6,232 0,308	6,712	0,367 3,678	1,833	13,524	5,12	0,6283	Y=1,1321X+2,2872
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	11,1331 1,4341	3,169 0,297	5,570	3,514 4,823		23,261		0,7441	Y=1,4341X+11,1331
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	13,4516 2,3867	2,791 0,497	5,584	4,820 4,806		23,096		0,7427	Y=2,3867X+13,4516
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	92,3855 -29,9620	17,860 7,754	6,503	5,173 -3,864		14,930		0,6511	Y=92,388-29,962X
AOB	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	9,3731 1,0894	5,957 0,294	6,416	1,573 3,702	1,833	13,708	5,12	0,6315	Y=1,0894X+9,3731
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	19,0915 1,2438	3,767 0,353	6,621	5,069 3,520		12,384		0,6075	Y=1,2438X+19,0915
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	20,8883 2,1193	3,188 0,567	6,380	6,552 3,735		13,953		0,6356	Y=2,1193X+20,8883
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	97,6223 -29,5090	16,277 7,067	5,927	5,998 -4,176		17,435		0,6855	Y=97,6223-29,5090
AOK	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	7,0272 1,2396	5,237 0,260	5,679	1,333 4,760	1,833	22,654	5,12	0,7390	Y=1,2396X+7,0272
	Efektif porozite (%)	Sabit n_e	16,9255 1,5464	2,460 0,231	4,324	6,881 6,699		44,876		0,8487	Y=1,5464X+16,9255
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w_k	19,4689 2,5636	2,218 0,395	4,438	8,778 6,495		42,184		0,8406	Y=2,5636X+19,4689
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	110,9485 -35,1092	10,706 4,648	6,712	10,363 -7,553		57,047		0,8770	Y=110,9485-35,1092X
	Ultrasonik dalga hızı (m/sn)	Sabit V_p	62,4958 -0,0078	8,335 0,002	5,570	7,498 -3,945		15,561		0,6604	Y=62,4958-0,0078X

Tablo 3.18'in devamı

Aşındırıcı	Kayaç Özelliği	Bağımsız Değişken	Katsayı	Standart Hata	Tahmin Standart Hatası	t	t-Tablo	F	F-Tablo	R ²	Regresyon Denklemi
Olivin	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	3,2003 1,0234	5,472 0,270	5,893	0,585 3,787	1,833	14,334	5,12	0,6419	Y=1,0234X+3,2003
Zımpara	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	3,1115 0,8330	4,047 0,200	4,359	0,769 4,167	1,833	17,365	5,12	0,6846	Y=0,833X+3,1115
	Schmidt sertliği (Dijital)	Sabit Q	66,3039 -0,6821	12,720 0,182	4,676	5,213 -3,747		14,041		0,6370	Y=66,3039-0,6821X
Cam	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Sabit ΔV	-4,3723 1,9116	10,752 0,531	11,580	-0,407 3,600	1,833	12,957	5,12	0,6183	Y=1,9116X-4,3723
Plastik	Efektif porozite (%)	Sabit n _e	1,9158 0,6348	1,398 0,131	2,457	1,371 4,840	1,833	23,424	5,12	0,7454	Y=0,6348X+1,9158
	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Sabit w _k	2,8839 1,0698	1,185 0,211	2,370	2,435 5,075		25,754		0,7630	Y=1,0698X+2,8839
	Yoğunluk (g/cm ³)	Sabit μ_n	39,3089 -13,8863	7,137 3,099	2,599	5,508 -4,481		20,081		0,7151	Y=39,3089-13,8863X

Y: Malzeme uzaklaştırma oranı (mm³/sn); X: İlgili kayaç özelliği

3.3. Kesme Genişliği

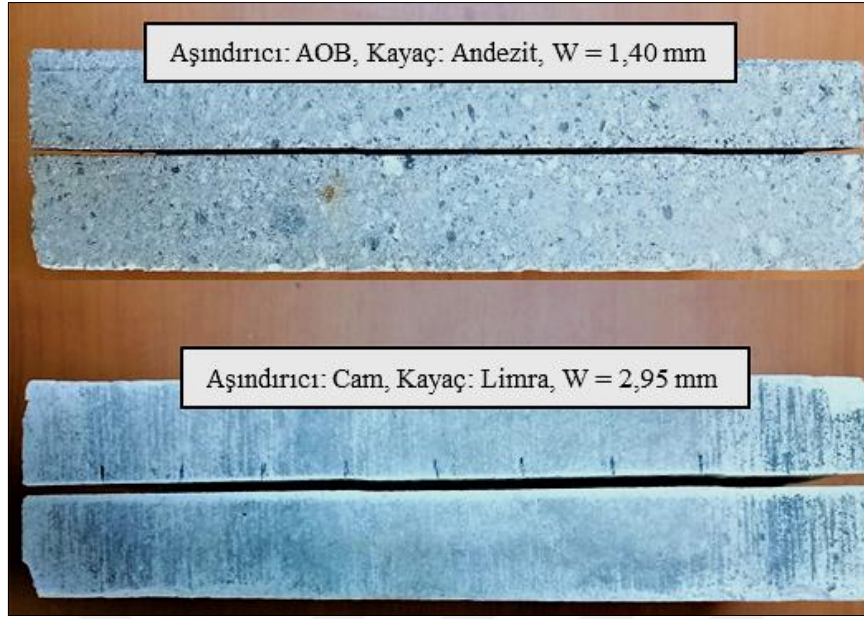
Kesme genişlikleri (W) ve standart sapmaları sırasıyla Tablo 3.19 ve 3.20’de verilmektedir. Kesme genişliklerinin dar bir aralıktadır değiştiği, birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle, tüm kesimlerde olduğa dar kesikler elde edilmiştir. En düşük kesme genişliği değeri 1,40 mm ile AOB’un aşındırıcı olarak kullanıldığı andezit kesiminden elde edilmiştir (şekil 3.27). En geniş kesim ise 2,95 mm ile camın aşındırıcı olarak kullanıldığı Limra-1’de görülmüştür (şekil 3.27). Tablo 3.20’de görüldüğü gibi, standart sapmalar olduğa düşük seviyelerdedir.

Tablo 3.19. Kesme genişlikleri, W (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	elik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	1,61	1,40	1,67	1,88	2,06	1,57	2,87	1,60
Lamprofir	1,78	1,55	1,56	2,06	2,23	1,83	2,06	1,70
Bazalt	1,80	1,53	1,60	2,34	2,28	2,13	2,13	1,80
Mermer	1,80	1,41	1,80	2,12	1,90	1,78	2,27	1,59
Traverten	1,79	1,42	1,72	2,03	2,49	1,90	2,90	1,84
Limra-1	1,46	1,68	1,74	2,80	2,16	2,53	2,95	1,90
Limra-2	1,91	1,52	2,05	2,29	1,64	1,64	2,60	1,79
Kayseri T�f	1,81	1,58	1,73	2,10	2,02	2,15	2,38	2,35
Rize T�f	1,75	1,61	1,72	2,08	1,73	1,70	2,19	1,68
Bayburt T�f	1,63	1,51	1,63	2,07	1,73	2,12	2,64	1,67

Tablo 3.20. Kesme genişlikleri standart sapmalar (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	elik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,06	0,05	0,11	0,15	0,10	0,07	0,07	0,37
Lamprofir	0,07	0,13	0,08	0,46	0,27	0,06	0,54	0,12
Bazalt	0,06	0,06	0,07	0,22	0,07	0,09	0,21	0,09
Mermer	0,11	0,15	0,10	0,04	0,11	0,08	0,14	0,10
Traverten	0,08	0,05	0,07	0,10	0,23	0,14	0,35	0,05
Limra-1	0,08	0,13	0,10	0,07	0,08	0,11	0,08	0,05
Limra-2	0,36	0,05	0,11	0,15	0,05	0,04	0,12	0,09
Kayseri T�f	0,07	0,11	0,16	0,19	0,08	0,10	0,14	0,11
Rize T�f	0,10	0,07	0,05	0,12	0,05	0,06	0,10	0,04
Bayburt T�f	0,08	0,08	0,13	0,07	0,08	0,12	0,09	0,09



Şekil 3.27. Kesme genişliği en düşük ve en yüksek kesimler

3.3.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kesme Genişliğine Etkileri

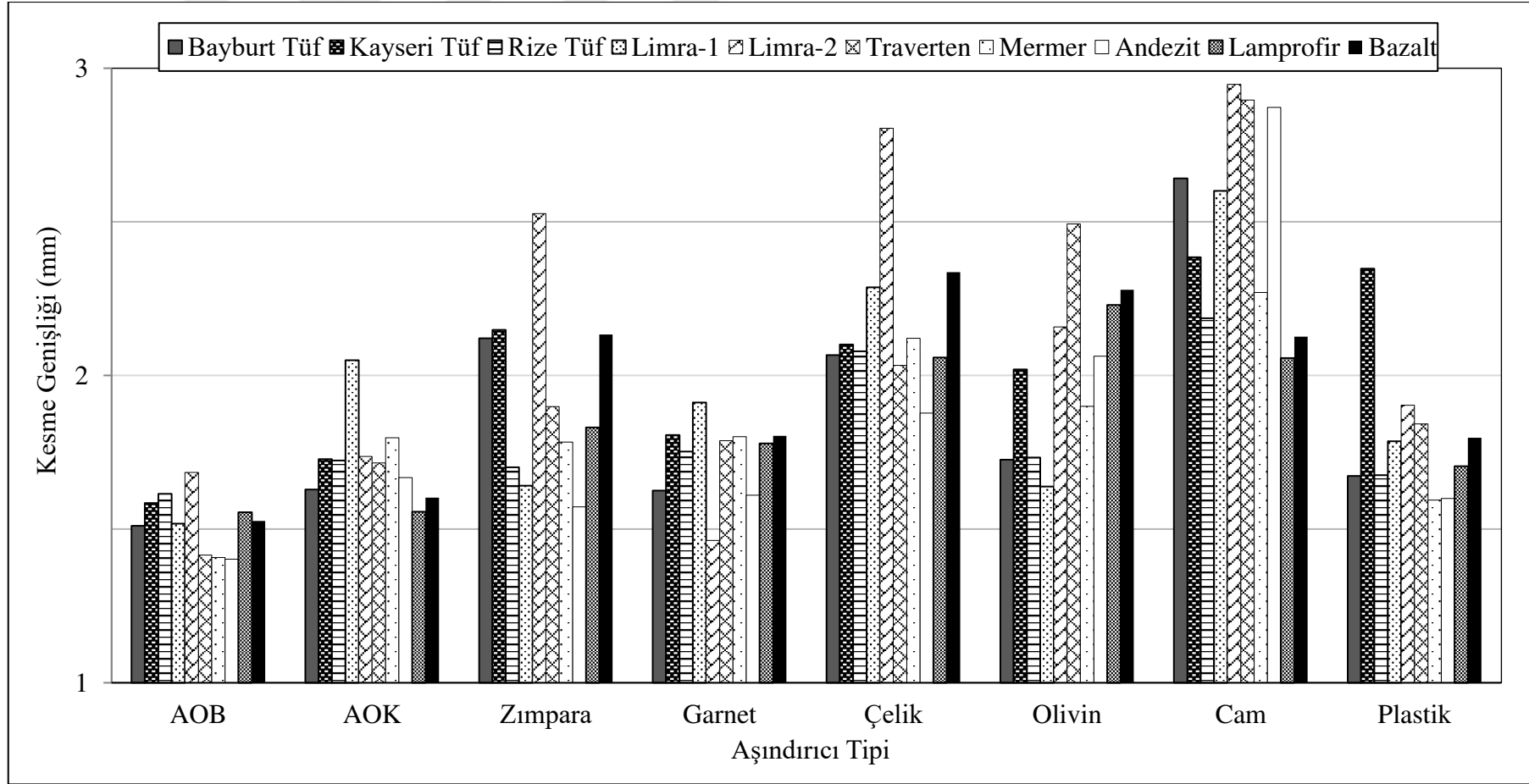
Kesme genişliği temelinde aşındırıcıların performansı Şekil 3.28’de görülmektedir. Şekilde farklı kayalardan elde edilen kesme genişlikleri aşındırıcı tipine göre gruplandırılmıştır. Kesme genişliği temelinde aşındırıcılar, her ne kadar değerler birbirinden çok uzak olmasa da yine gruplandırılabilir. Kayaç tipine göre; AOB ile en düşük kesme genişlikleri (1,40-1,68 mm) elde edilmiş, onu AOK ve garnet takip etmiş (1,46-2,05 mm), ardından orta grupta plastik, olivin ve zımpara (1,59-2,53 mm) yer almıştır. En geniş kesikler ise cam ve çelik ile elde edilmiştir (1,88-2,95 mm). Küresel tane şekilli olan aşındırıcılarla (cam ve çelik) daha yüksek kesme genişliği değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu durum, kesilen numunenin yüzeyine temas eden aşındırıcının alanıyla ilgili olmasına bağlanabilir. Jet içerisindeki aynı boyuttaki küresel aşındırıcı tanelerin çapları eşittir. Numune yüzeyine noktasal şekilde temas ederler. Oysa aynı boyuttaki köşeli, düzensiz şekilli tanelerin 3 boyutu birbirinden farklı olacağından, maksimum ve minimum çap (ya da uzunlukları) çeşitlilik gösterebilir. Levha gibi basık (bir boyutu diğer ikisine göre çok küçük), çubuk gibi uzun (bir boyutu diğer ikisine göre çok büyük) dahi olabilirler. Bu düzensiz şekilli tanelerin jet içerisinde numune yüzeyine çarptıkları andaki alanları farklılık gösterebilir. Bu da kırılma/parçalanma oranları ve yeniden şekillenmelerinde rol oynayabilir. Dolayısıyla

oluşan kesiğin genişliği etkilenebilir. Örneğin, levha şeklindeki bir aşındırıcı tanenin dik ya da yan şekilde numune yüzeyine çarpması farklı parçalanma çeşit ve şekilleri doğurabilir. Özetle; küresel taneler noktasal, diğer taneler alansal şekilde numune yüzeyine çarptıkları için küresel tanelerin dağılıp parçalanarak boyutlarının küçülmesi daha az olabilir. Bu da aynı boyutta, düzensiz tanelere göre çapı büyük tanelerin kesme genişliğini arttırmasını açıklayabilir. Kaya (2016) da benzer şekilde cam ile mermer kesiminde daha geniş kesikler elde etmiştir.

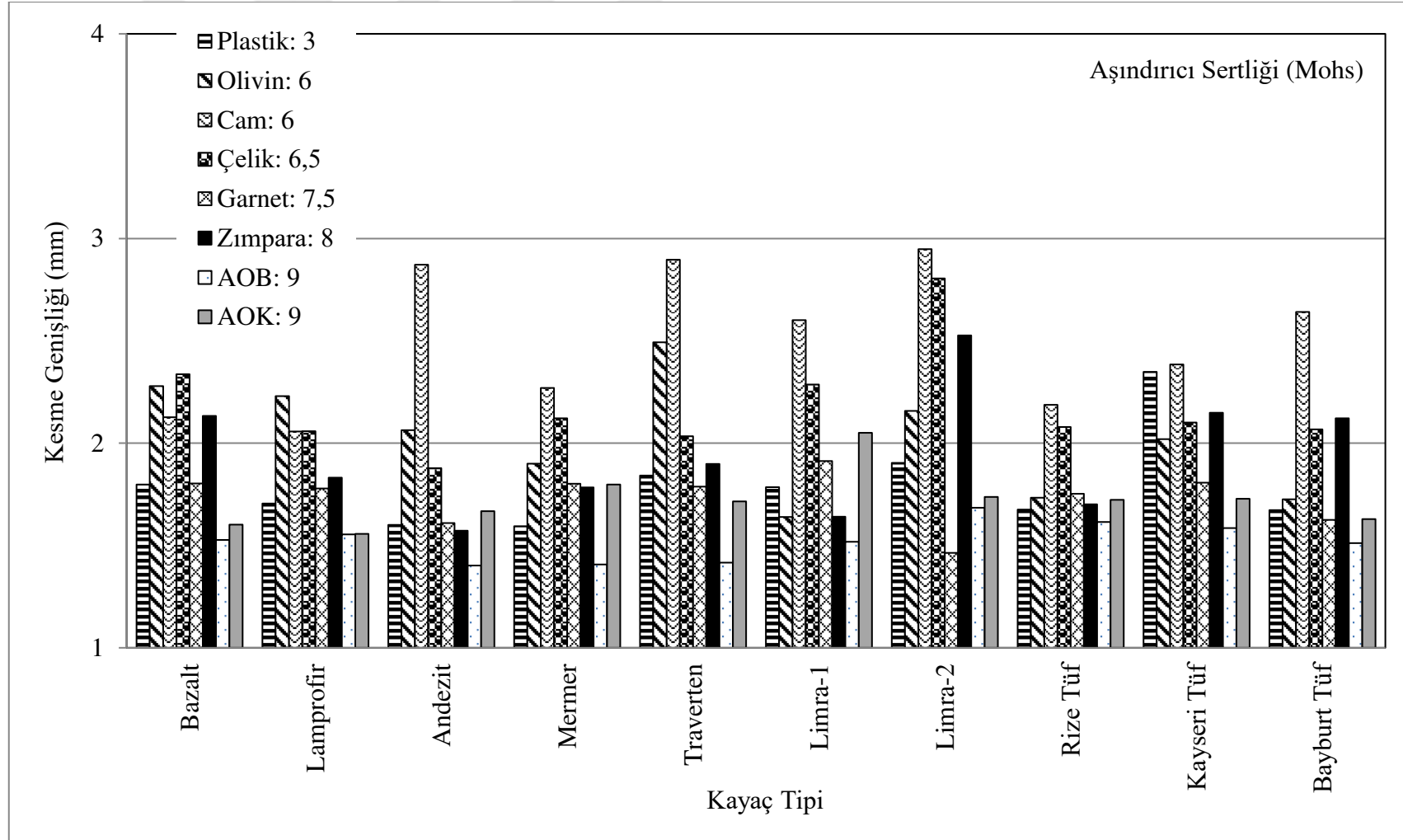
Aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarına göre kesme genişlikleri sırasıyla Şekil 3.29 ve 3.30’da verilmiştir. Tablo 3.21’de ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle kesme genişlikleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir. Aşındırıcıların artan sertliğiyle birlikte kesme genişliği azalma eğilimi gösterse de aralarındaki ilişki, yüksek (r : -0,79) ve orta olanları (r : -0,42) hariç, çok düşük-düşük olarak gerçekleşmiştir (kayaç tipine göre r : -0,17 – -0,39). Aşındırıcıların yoğunluğuyla kesme genişlikleri arasında ise anlamlı bir eğilim ve ilişki tespit edilmemiştir. Bu bulgular, önceki çalışmalarda da (Kaya, 2016; Aydın vd., 2019) elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Tablo 3.21. Kesme genişliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

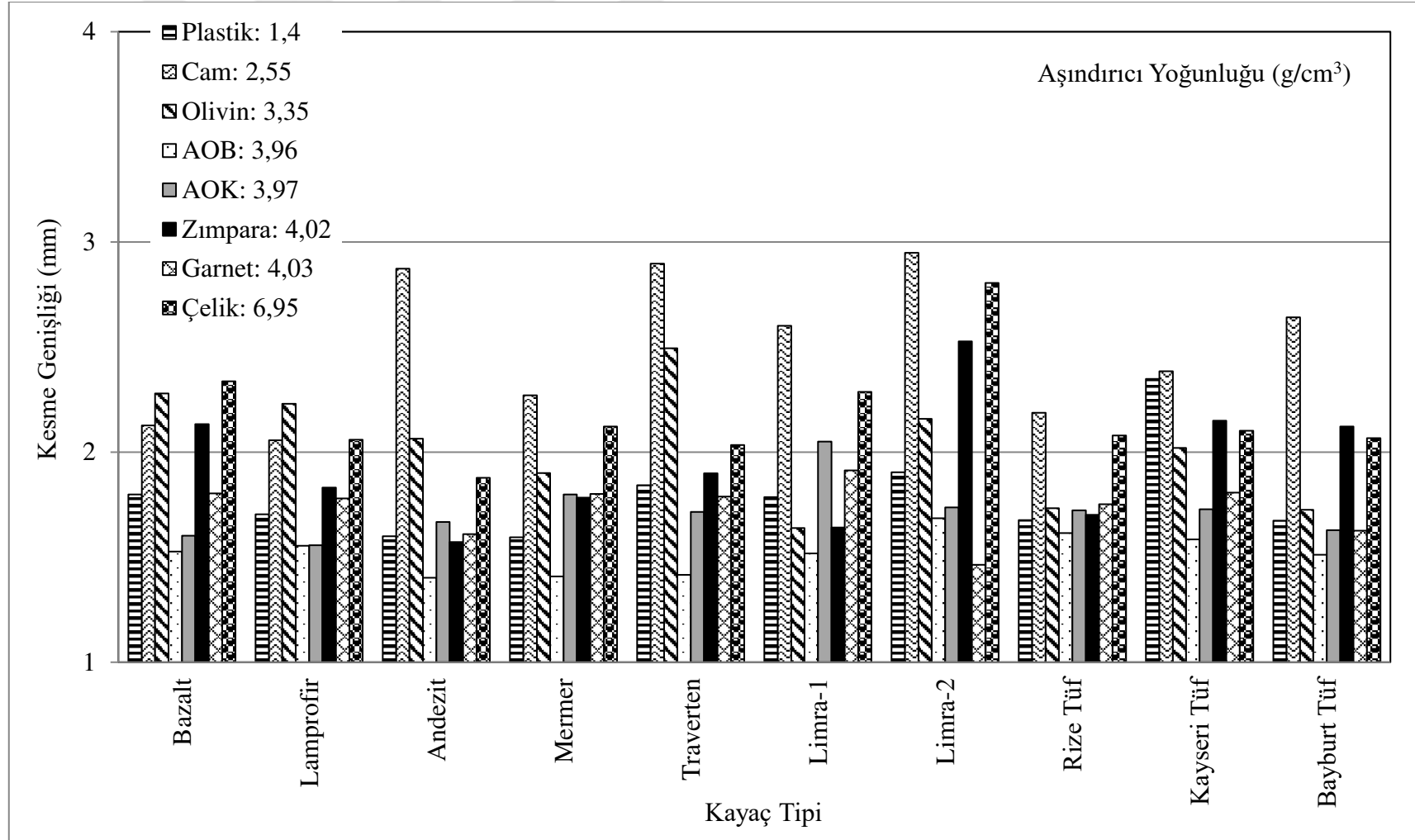
Aşındırıcı Özellik	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,36	-0,39	-0,30	-0,18	-0,42	-0,17	-0,24	-0,21	-0,79	-0,19
Yoğunluk (g/cm ³)	0,32	0,17	-0,18	0,27	-0,20	0,16	0,23	0,28	-0,35	0,02



şekil 3.28. Aşındırıcı tipine göre kesme genişlikleri



şekil 3.29. Aşındırıcı sertliğine göre kesme genişlikleri



şekil 3.30. Aşındırıcı yoğunluğuna göre kesme genişlikleri

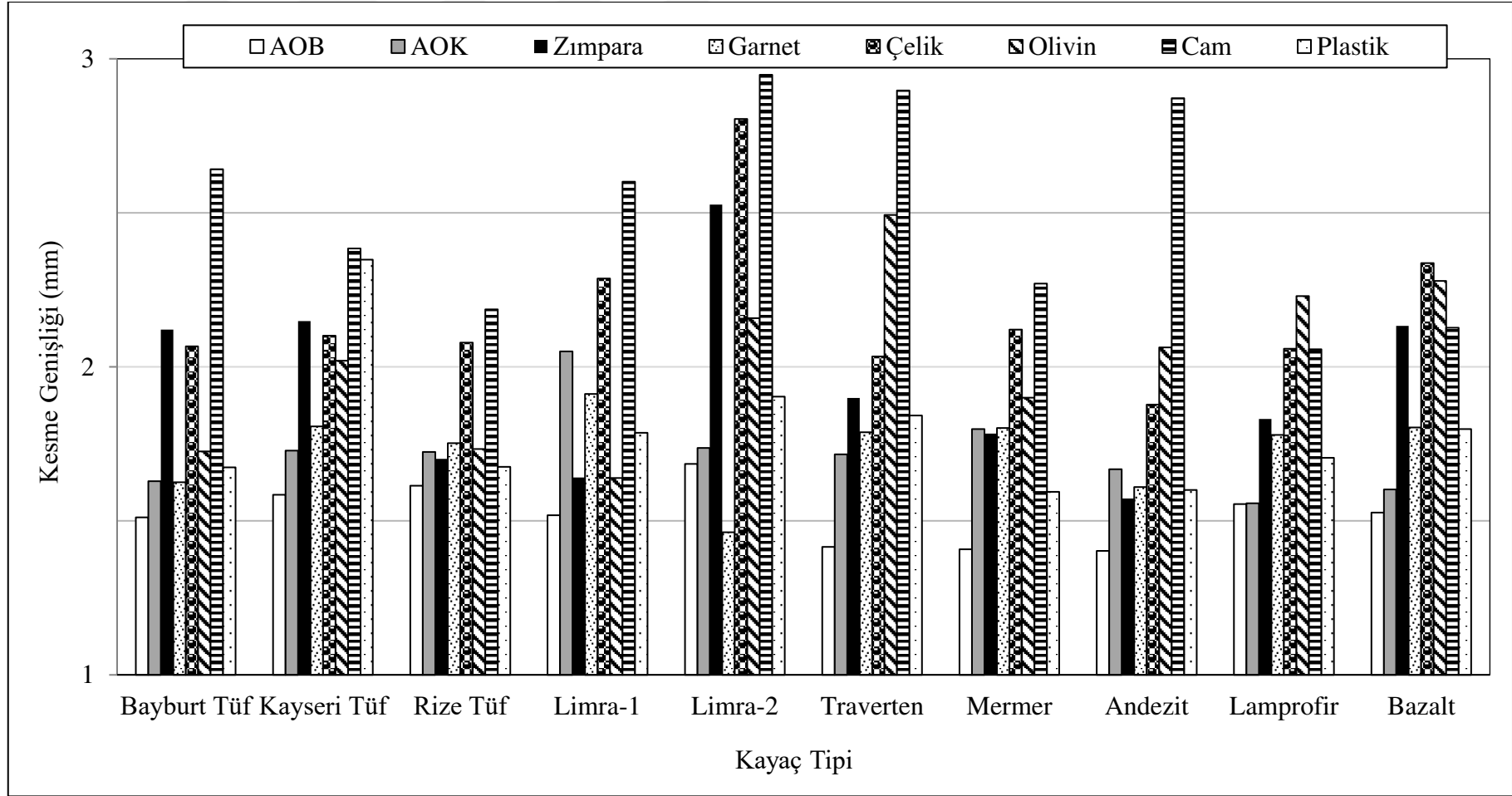
3.3.2. Kayaç Özelliklerinin Kesme Genişliğine Etkileri

Kayaç tipine göre kesme genişlikleri Şekil 3.31’de gösterilmektedir. Aşındırıcı tipine göre elde edilen kesme genişlikleri ile kayaç tipleri arasında anlamlı bir farklılık görülmemektedir. Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri temelinde kesme genişlikleri ise Şekil 3.32-3.38’de verilmiştir. Tablo 3.22’de ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellik değerleriyle kesme derinlikleri arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

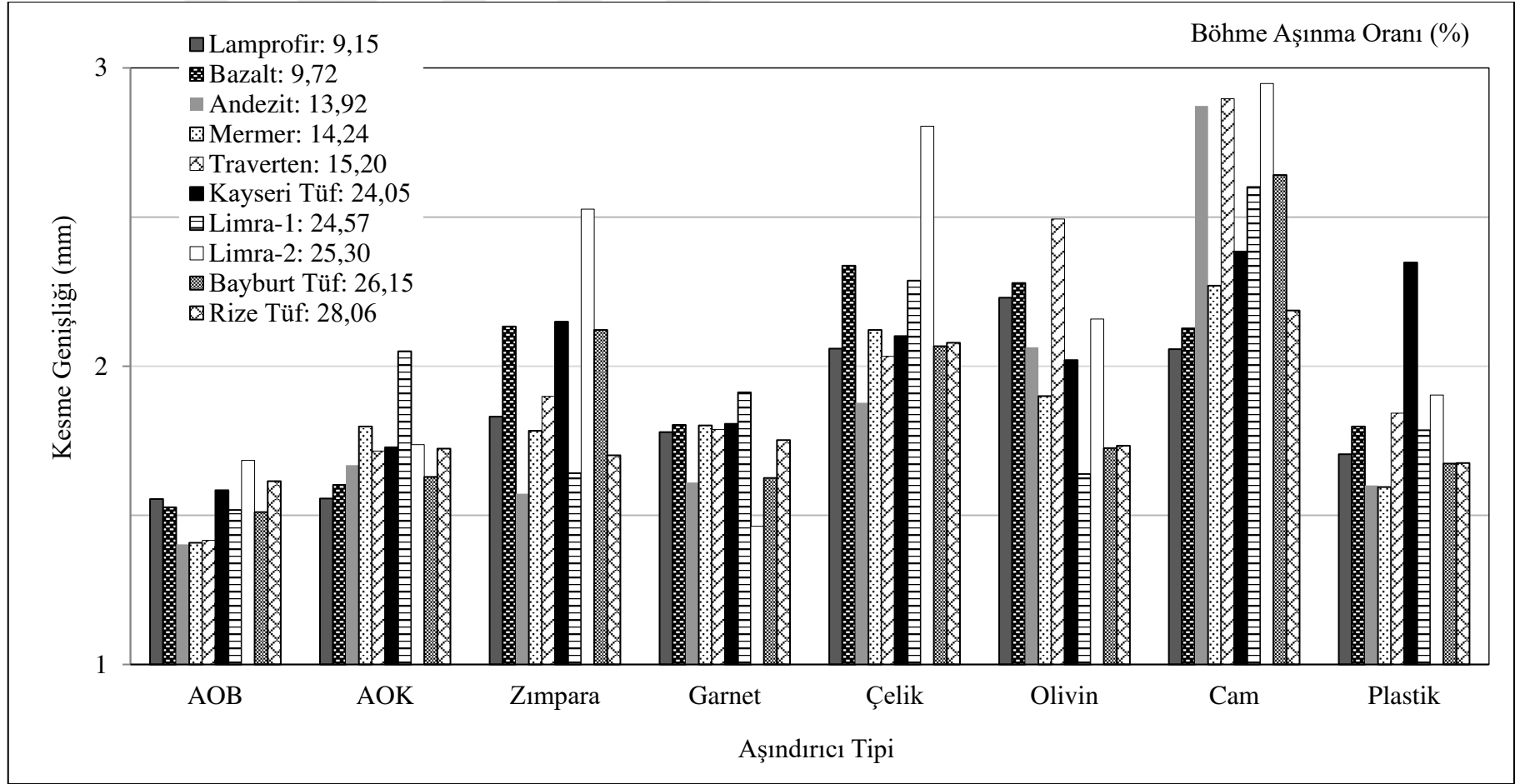
Tablo 3.22. Kesme genişliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,53	0,48	0,37	-0,29	-0,49	-0,51	-0,18	-0,16	-0,04	-0,34
AOK	0,45	-0,16	-0,17	0,05	-0,40	-0,40	-0,53	-0,54	-0,51	0,13
Zımpara	0,22	0,30	0,28	-0,22	-0,09	-0,05	-0,03	-0,05	0,08	-0,18
Garnet	-0,23	-0,35	-0,33	0,31	0,24	0,17	0,26	0,28	0,09	0,22
Çelik	0,27	-0,02	-0,08	0,13	-0,29	-0,21	-0,07	-0,10	0,14	0,16
Olivin	-0,66	-0,51	-0,52	0,50	0,70	0,78	0,67	0,70	0,64	0,39
Cam	0,29	0,08	0,10	-0,26	-0,19	-0,10	-0,49	-0,49	-0,45	-0,10
Plastik	0,29	0,27	0,21	-0,29	0,07	0,03	-0,11	-0,11	-0,31	-0,44

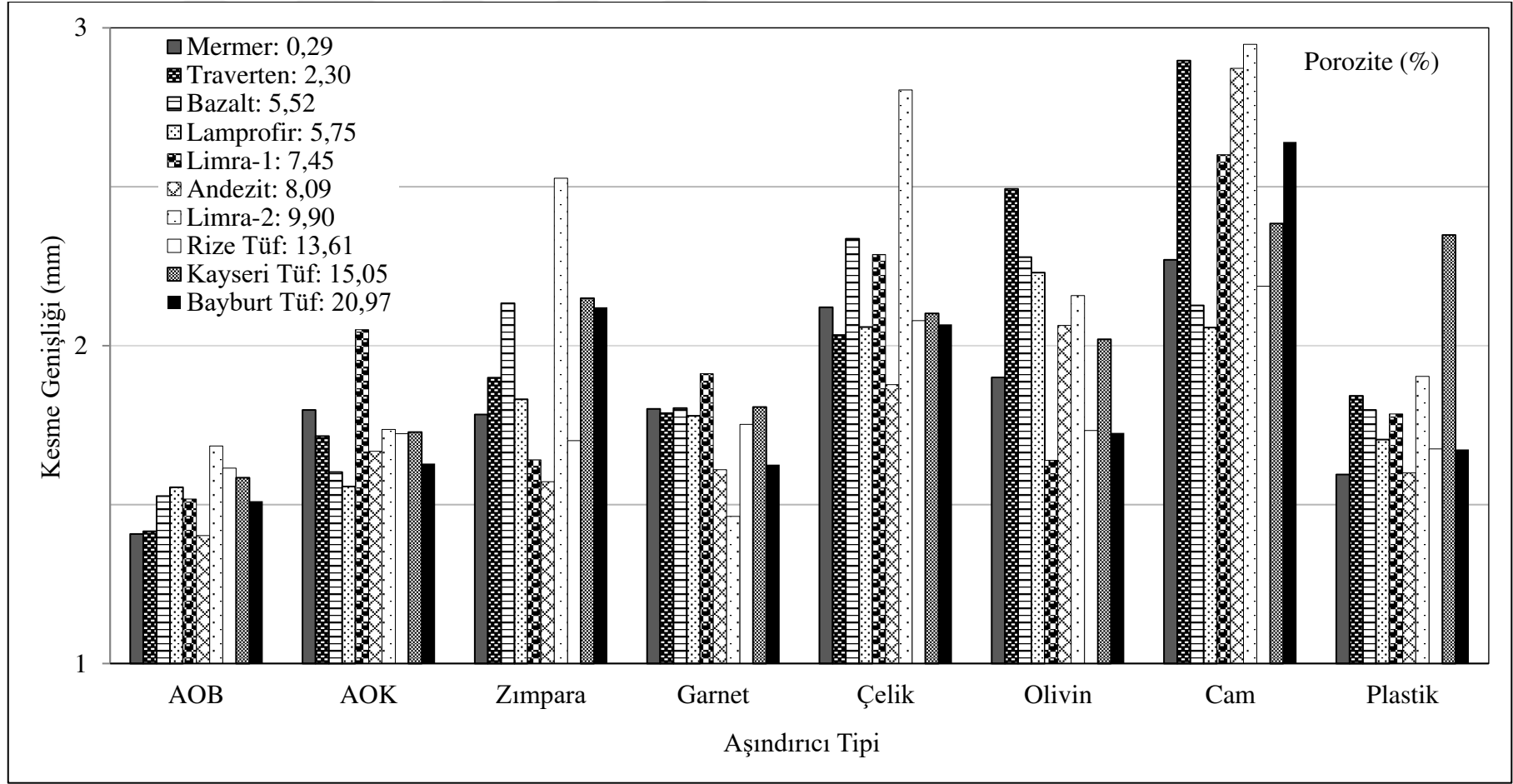
Çalışılan hiçbir kayaç özelliğinin kesme genişliği üzerinde tanımlanabilir bir eğilime imkân sağlamadığı görülmektedir. Literatürde, ASJ ile kayaç kesmede ağırlıklı olarak belirtildiği gibi kesme genişliği, daha ziyade kesme parametrelerine (nozül-numune mesafesi, aşındırıcı besleme miktarı, nozül çapı vs.) göre değişmektedir. Örneğin kesme genişliğinin nozül çapının 2-3 katı olacağı belirtilmiştir (Kaya, 2016; Perc vd., 2019). Bu çalışmada elde edilen minimum ve maksimum kesme genişliği baz alındığında, kullanılan nozül çapının (1,1 mm) 1,27-2,95 katı kesme genişlikleri elde edilmiştir.



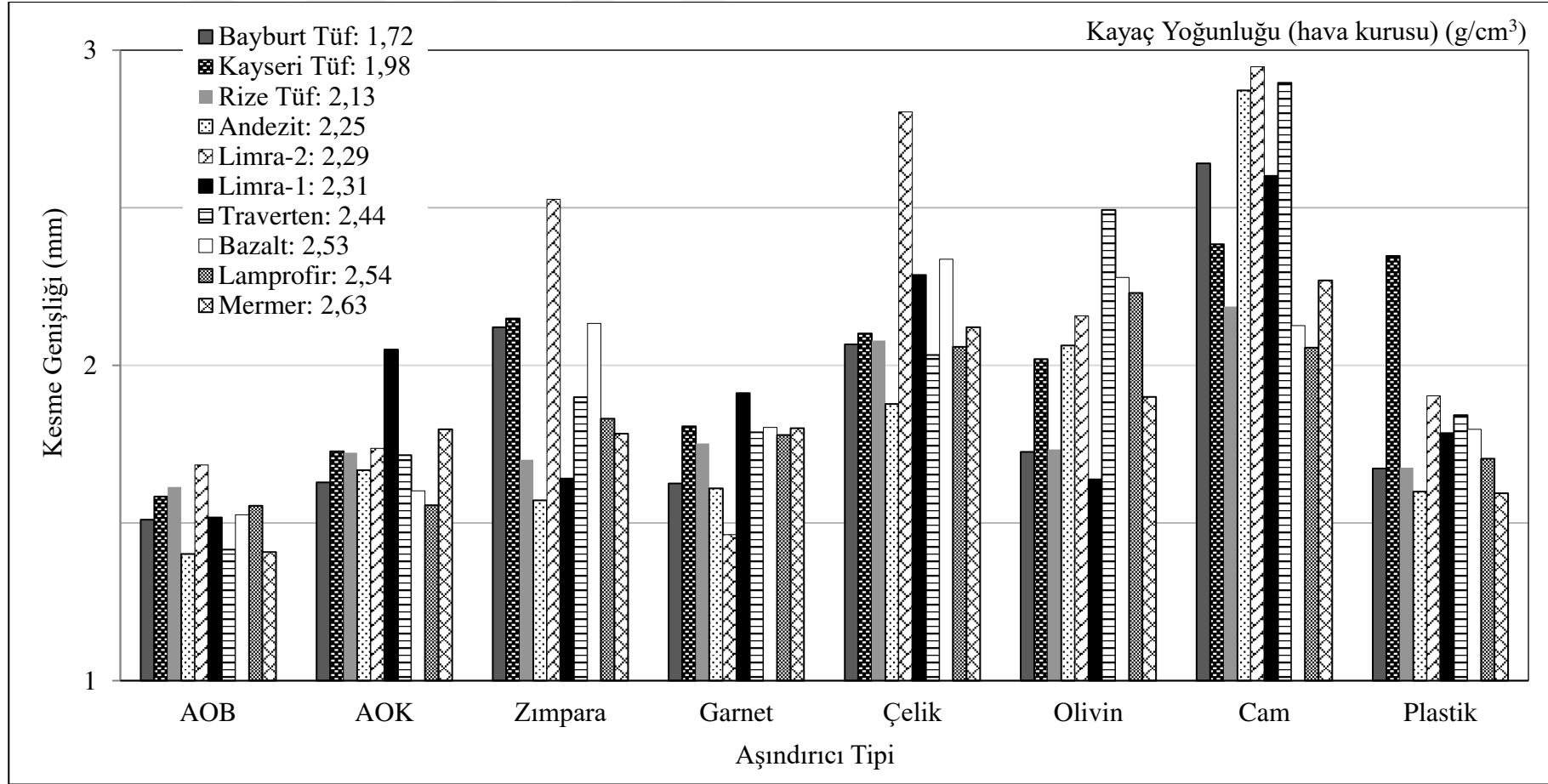
Şekil 3.31. Kayaç tipine göre kesme genişlikleri



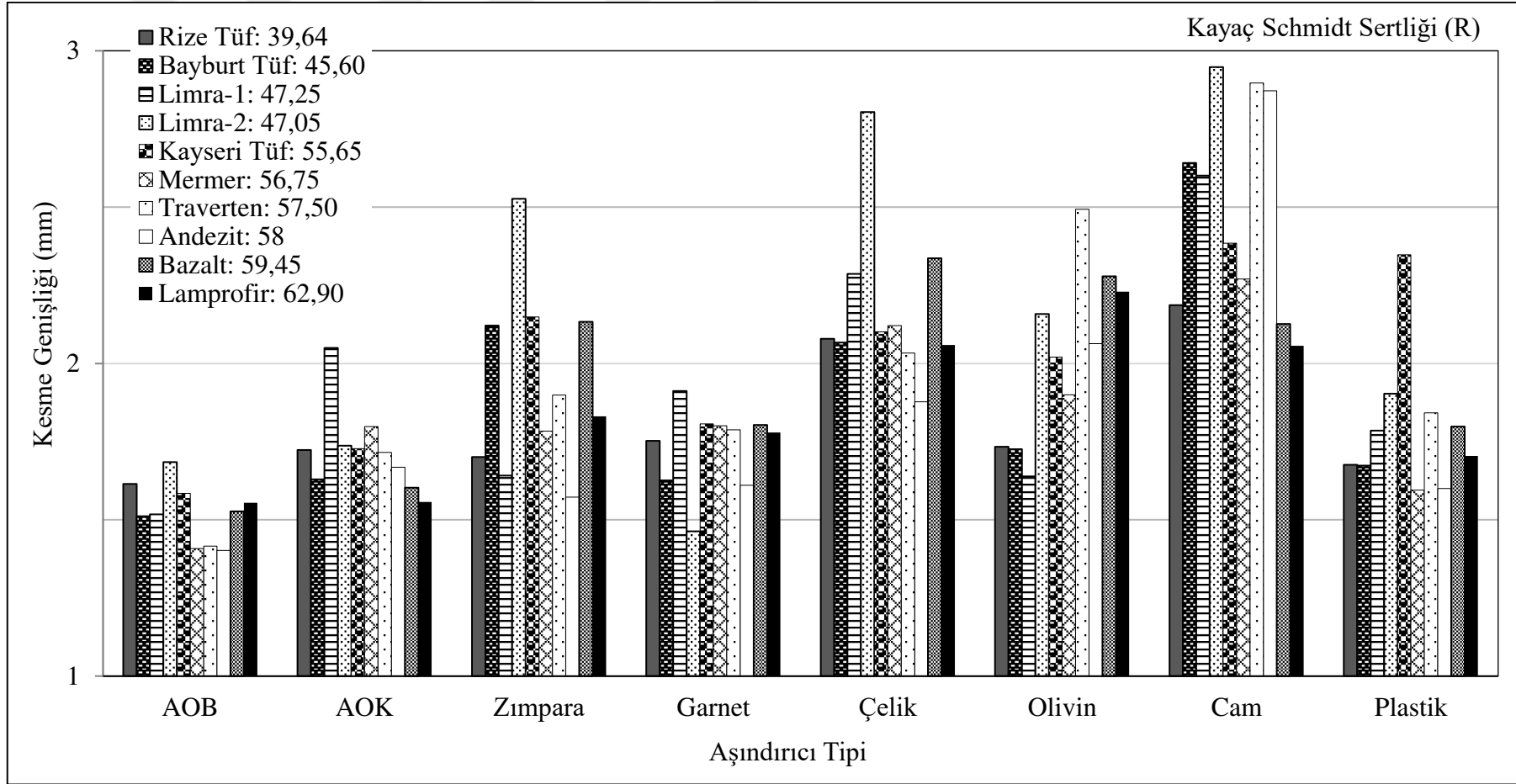
Şekil 3.32. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre kesme genişlikleri



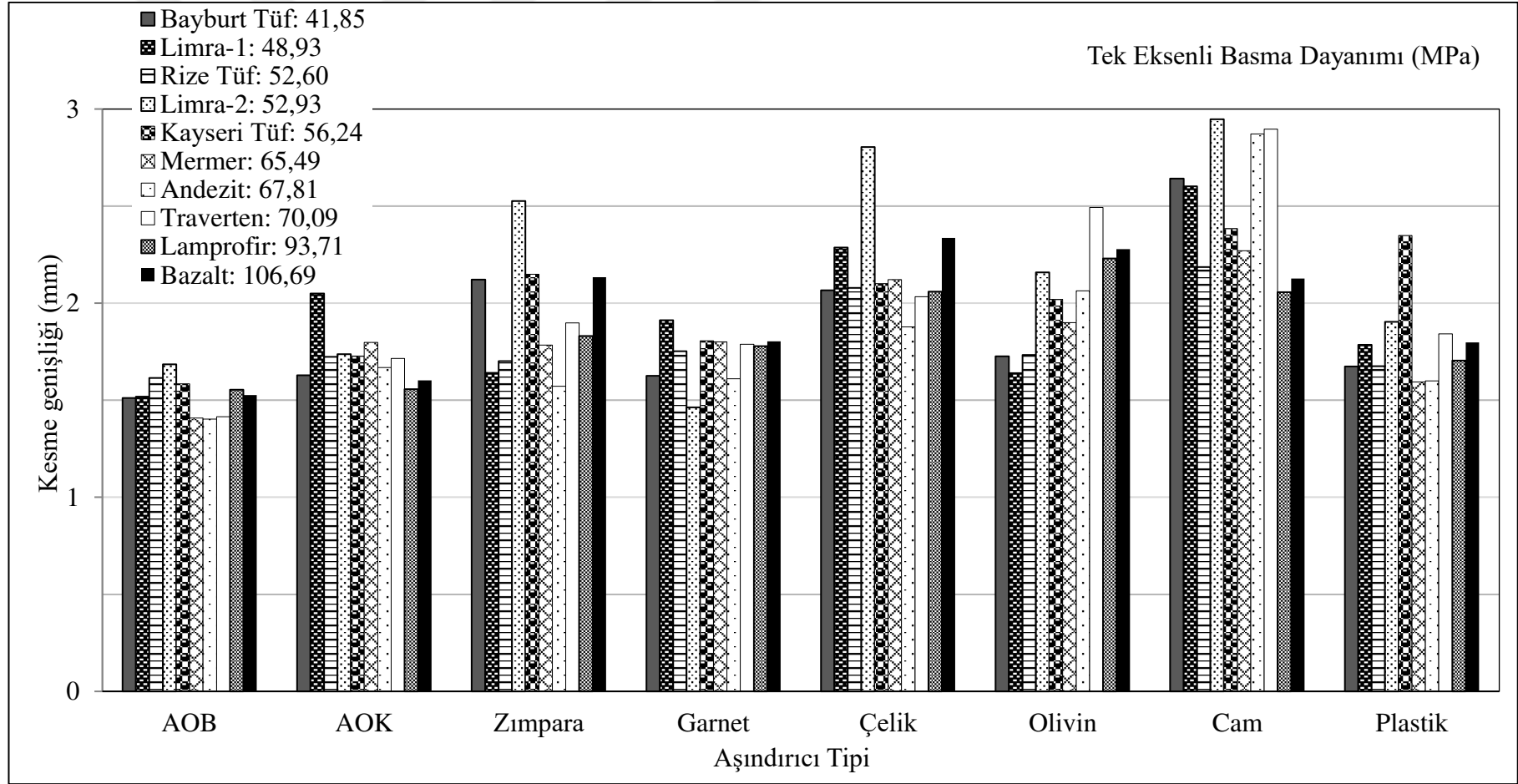
şekil 3.33. Kayaçların porozitelerine göre kesme genişlikleri



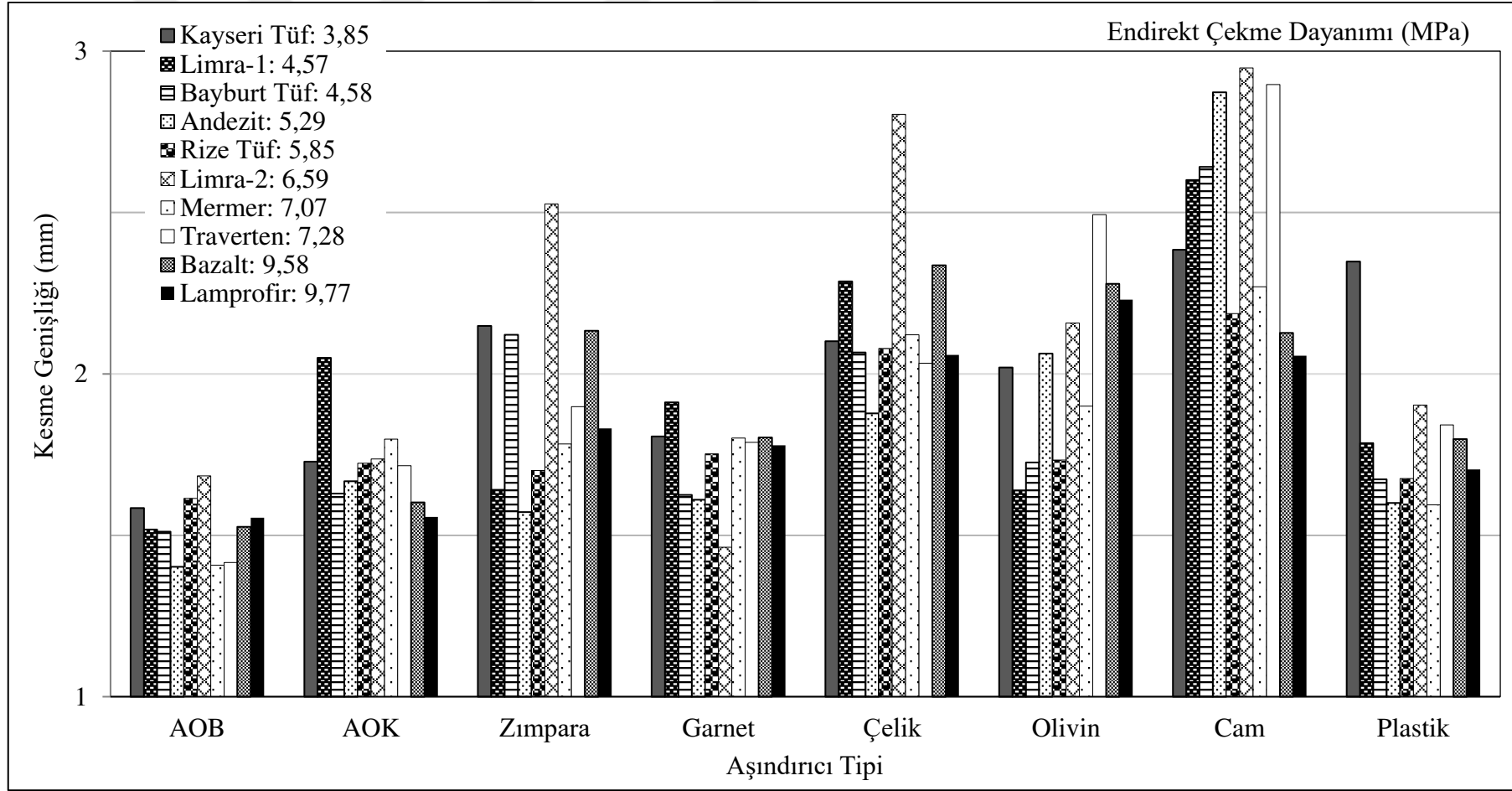
Şekil 3.34. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre kesme genişlikleri



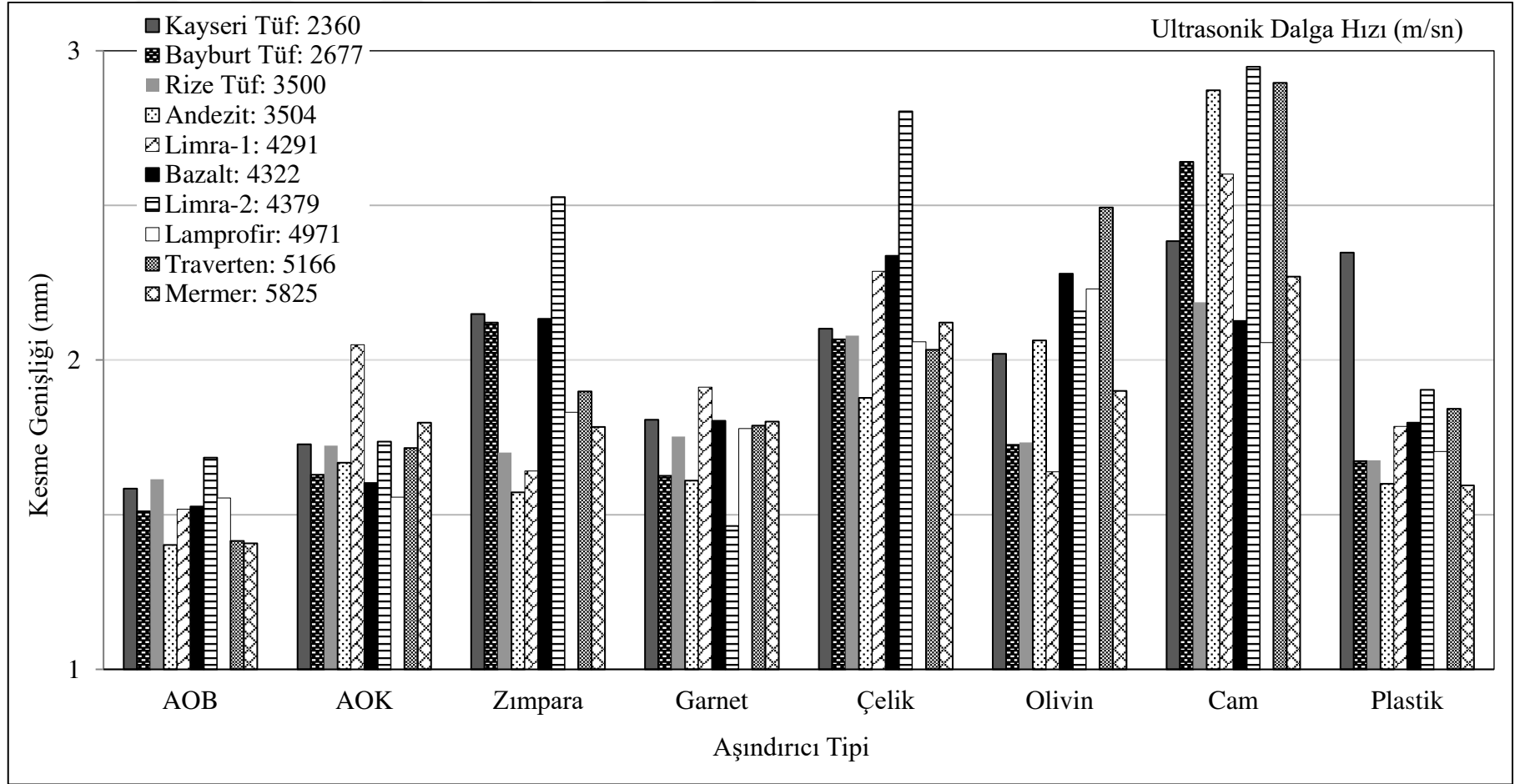
Şekil 3.35. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre kesme genişlikleri



Şekil 3.36. Kayaların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre kesme genişlikleri



Şekil 3.37. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre kesme genişlikleri



Şekil 3.38. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre kesme genişlikleri

3.4. Kerf Geometrisi

3.4.1. Kerf Açısı

ASJ'nin kesilen kayaç numunesine giriş yaptığı, kesimin başlangıç tarafından ölçülen giriş kerf açıları ve jetin numuneden çıkış yaptığı kısımdan ölçülen çıkış kerf açıları (Θ) sırasıyla Tablo 3.23 ve 3.24'te verilmektedir.

Tablo 3.23. Giriş kerf açıları, Θ ($^{\circ}$)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,28	0,04	0,07	0,74	0,04	0,41	1,19	4,19
Lamprofir	0,55	0,25	0,20	-1,42	1,09	0,53	1,14	1,66
Bazalt	0,37	0,39	0,37	0,63	1,06	1,06	0,41	2,18
Mermer	0,71	0,09	0,80	0,00	0,81	2,25	0,40	3,84
Traverten	0,39	0,34	0,08	0,56	0,91	0,96	0,69	2,58
Limra-1	0,54	0,09	0,04	0,02	0,12	1,34	0,10	2,44
Limra-2	0,12	0,02	0,35	-0,65	0,15	0,42	0,09	2,15
Kayseri Tüf	0,02	0,13	0,06	0,01	0,23	0,48	0,02	2,02
Rize Tüf	0,05	0,03	0,04	0,04	0,13	0,11	0,31	1,92
Bayburt Tüf	0,09	0,00	0,06	-0,14	0,17	0,66	0,31	0,69

Tablo 3.24. Çıkış kerf açıları, Θ ($^{\circ}$)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	2,00	0,32	0,90	0,06	1,23	1,91	1,36	1,37
Lamprofir	1,37	0,85	1,15	1,50	2,57	1,68	0,25	2,33
Bazalt	0,91	1,13	0,85	1,74	1,39	1,10	0,94	4,66
Mermer	0,72	0,05	1,32	0,23	2,16	1,86	0,67	5,67
Traverten	1,81	1,92	0,62	0,15	1,96	1,60	4,26	6,40
Limra-1	0,56	0,51	0,65	0,35	1,09	1,09	0,82	3,45
Limra-2	1,73	0,27	0,81	0,18	0,78	1,07	0,82	2,28
Kayseri Tüf	0,36	0,37	0,56	0,05	0,80	0,67	0,37	4,41
Rize Tüf	0,52	0,69	0,32	0,09	0,91	0,79	0,56	0,66
Bayburt Tüf	0,31	0,06	0,58	-0,43	0,62	0,90	0,70	1,69

Kerf açılarının oldukça dar aralıkta değiştiği görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, bu sonuçlar, dike yakın bir kesim yapıldığının bir göstergesidir. Çeliğin kullanıldığı bazı kesimlerde negatif kerf açıları (yüzeyden dibe doğru genişleyen), önemli bir bulgu olarak göze çarpmaktadır. Bu durumun muhtemel nedenleri çelik içeren jetin yüksek kinetik

enerjiyle (çok yüksek yoğunluklu olduğu için) numuneye çarpması ve çeliğin kırılma/parçalanma özelliklerinin diğer aşındırıcılardan farklı olması olarak gösterilebilir. Cha vd. (2021), ASJ ile granit kestikleri çalışmalarında aşındırıcı olarak kullandıkları çeliğin parçalanmasının düşük olduğunu (%60 geri dönüşüm oranı), kesim işleminden sonra kalan parçaların ideal şeklini (küresel) koruduğunu tespit etmişlerdir. Çalışmada, en düşük giriş kerf açısı değeri $-1,42^\circ$ ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı lamprofir kesiminden (Şekil 3.39), en büyük giriş kerf açısı değeri ise $4,19^\circ$ ile plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı andezitten elde edilmiştir. Çıkış kerf açısında ise en küçük değer $-0,43^\circ$ ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı Bayburt Tuf kesiminde, en büyük değer ise $6,40^\circ$ ile plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı travertende görülmüştür (Şekil 3.39). Ancak, kesimin derine doğru diklikten negatif değerde sapması da kesme performansını olumlu olarak gösteremez. Dik bir kesim, yani 0° değere en yakın kerf açısı değeri en iyi performansı verecektir. Dolayısıyla mutlak değeri en küçük olan kerf açısının en iyi kesme performansını verdiği söylenebilir. Aşındırıcı olarak çeliğin kullanıldığı mermer ve AOB'un kullanıldığı Bayburt Tuf (Şekil 3.39) kesimlerinde en iyi giriş kerf açıları (dik, $0,00^\circ$), elde edilmiştir. Çıkış kerf açısında ise $0,05^\circ$ ile aşındırıcı olarak AOB'un kullanıldığı mermer ve çeliğin kullanıldığı Kayseri Tuf kesimlerinde en iyi sonuçlar kaydedilmiştir.



Şekil 3.39. En küçük (negatif), en büyük ve sıfır kerf açısı elde edilen kesimler

3.4.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Kerf Açılarına Etkileri

Kerf açıları temelinde aşındırıcıların performansları Şekil 3.40 ve 3.41’de sunulmaktadır. Kerf açıları temelinde aşındırıcılar, her ne kadar oldukça dar bir aralıkta değişse de bir sınıflandırmanın yapılabilmesi mümkündür. İlk göze çarpan, plastikte diğerlerinden daha yüksek kerf açılarının elde edildiğidir (kayaç tipine göre girişte $0,69^{\circ}$ - $4,19^{\circ}$ ve çıkışta $0,66^{\circ}$ - $6,40^{\circ}$). Diğer aşındırıcılar ile benzer kerf açılı kesimler elde edilmiştir. En düşük açılı kesimler girişte AOB (kayaç tipine göre $0,00^{\circ}$ - $0,39^{\circ}$) ve AOK (kayaç tipine göre $0,32^{\circ}$ - $1,32^{\circ}$) ile elde edilmiştir. Çelik ile yapılan kesimlerin bazılarında ise ters kerf (negatif açı) oluşmuştur. Genel olarak, çıkış kerf açılarının giriş kerf açılarından az miktarlarda yüksek oldukları da görülmektedir.

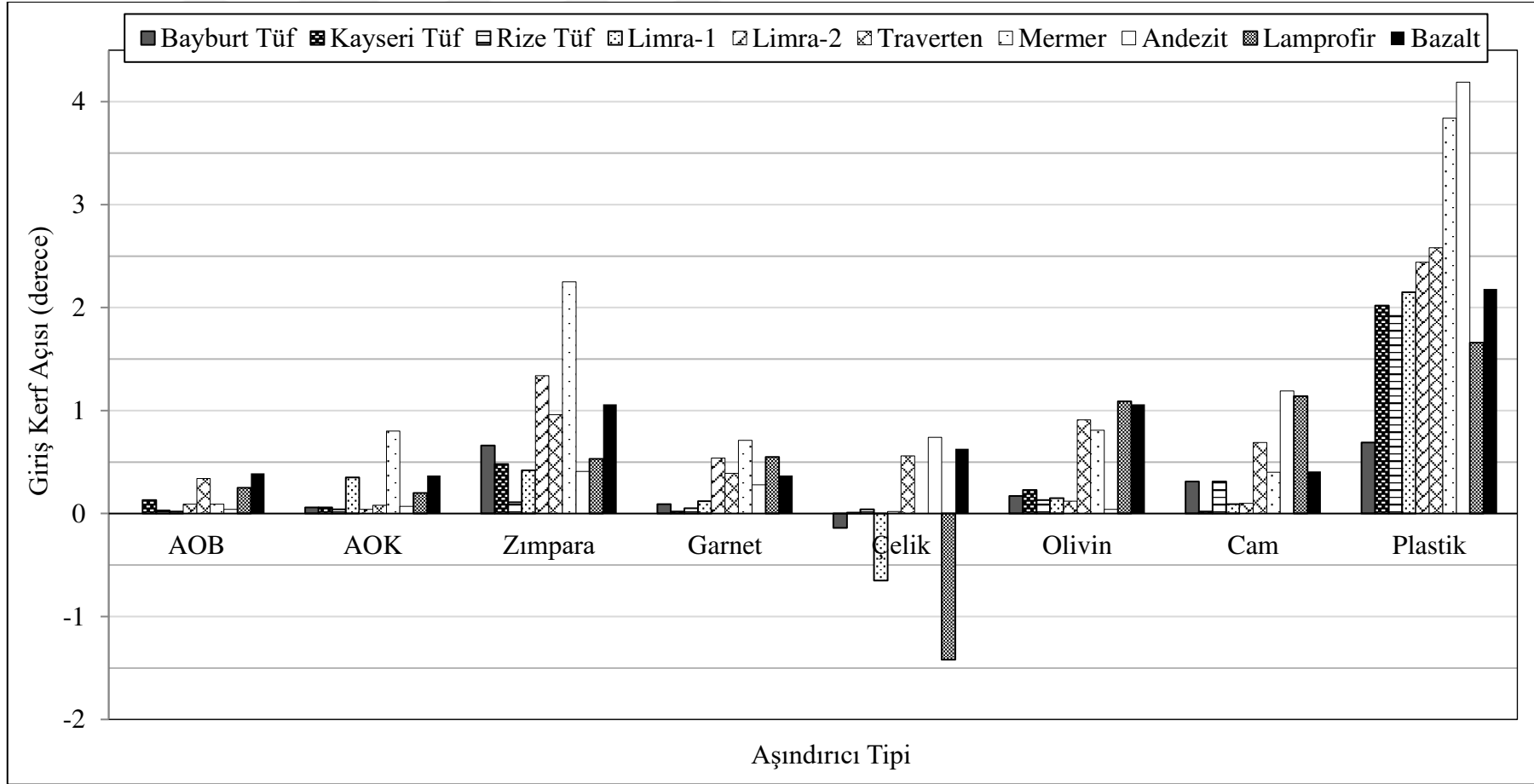
Şekil 3.42 ve 3.43’te aşındırıcıların sertliğine, 3.44 ve 3.45’te ise yoğunluğuna göre kerf açıları verilmektedir. Tablo 3.25 ve 3.26’da ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle kerf açıları arasındaki korelasyon katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 3.25. Giriş kerf açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

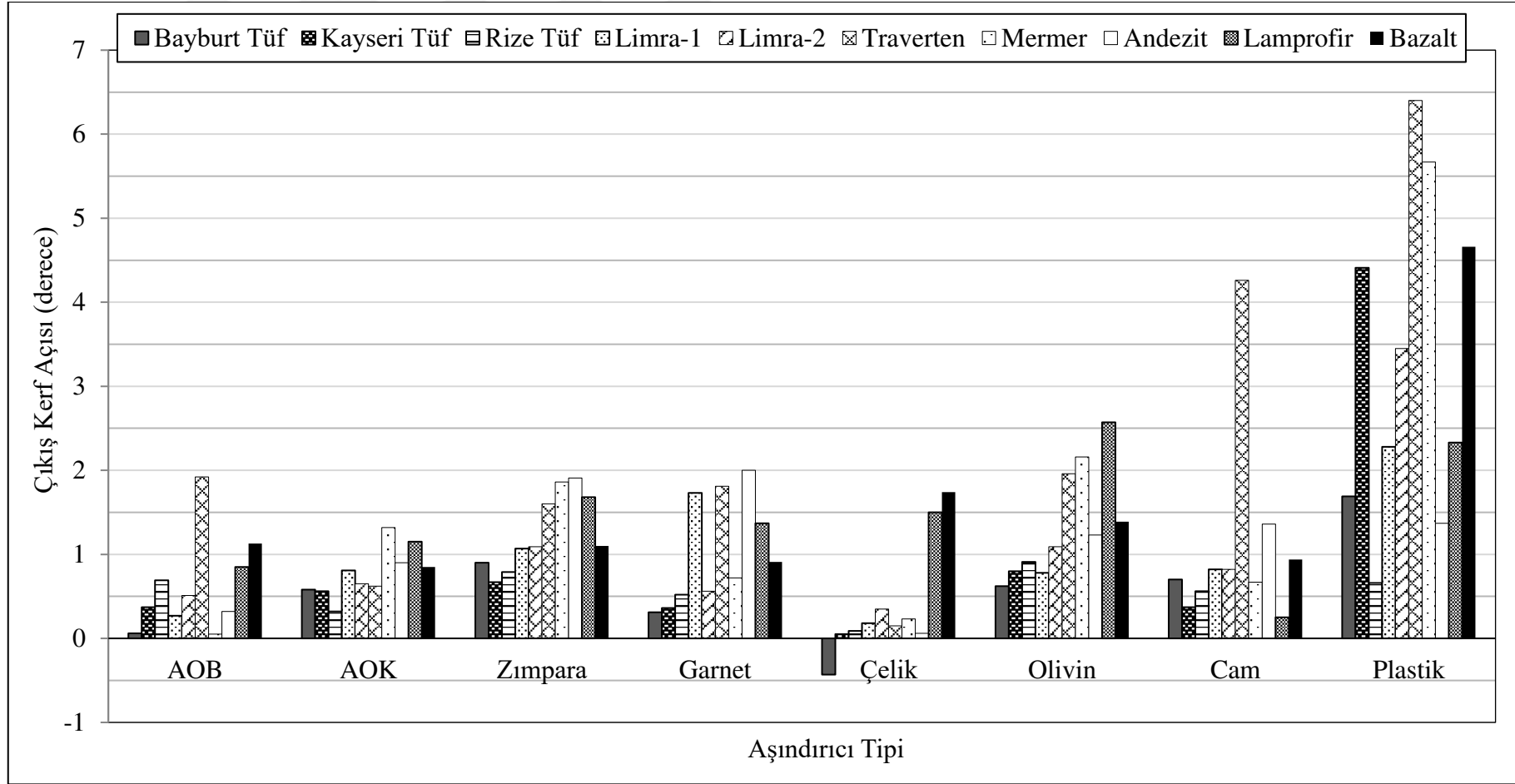
Aşındırıcı Özelligi	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,80	-0,47	-0,86	-0,61	-0,88	-0,63	-0,62	-0,84	-0,75	-0,50
Yoğunluk (g/cm^3)	-0,52	-0,97	-0,57	-0,63	-0,61	-0,80	-0,56	-0,67	-0,62	-0,70

Tablo 3.26. Çıkış kerf açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

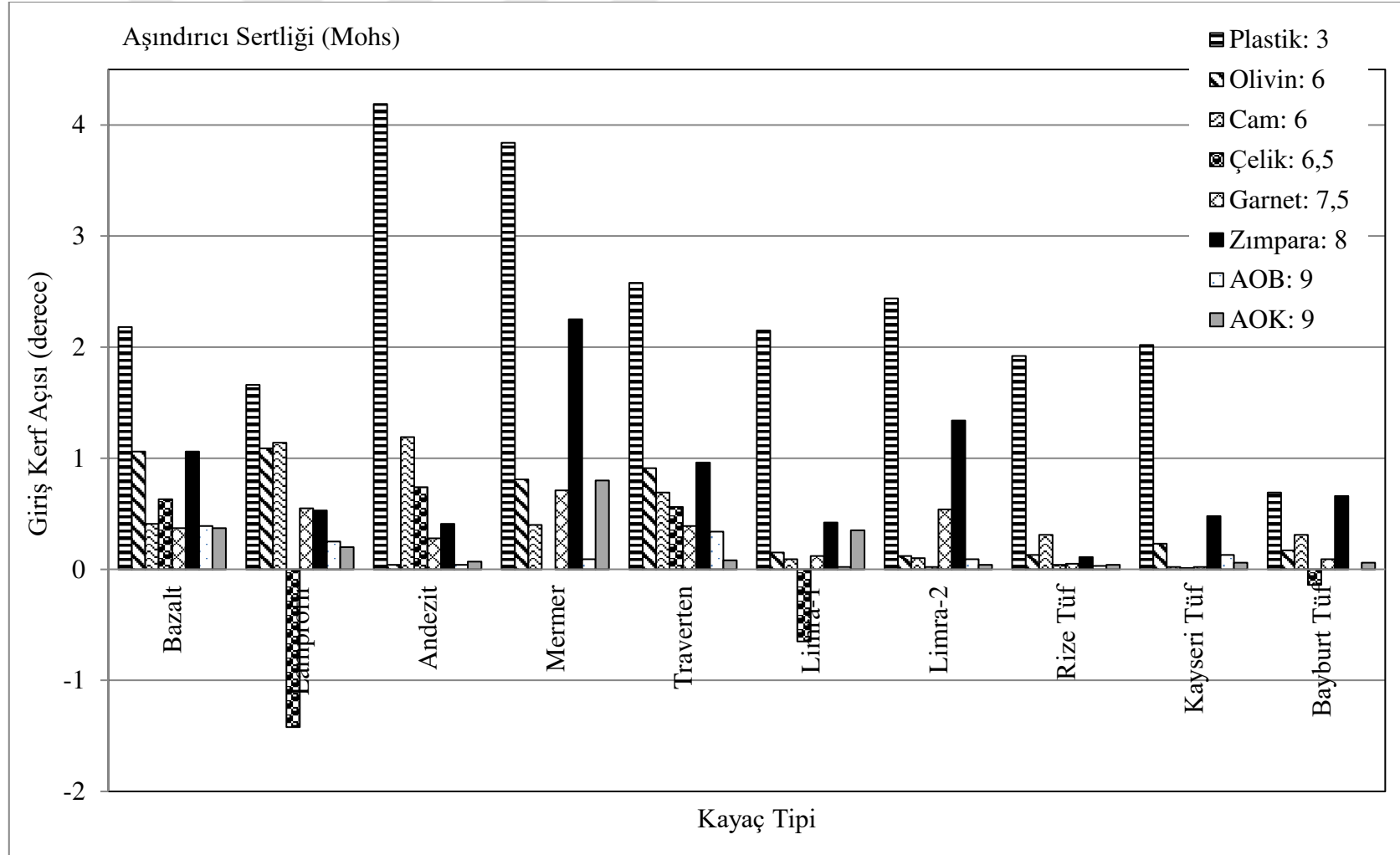
Aşındırıcı Özelligi	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,84	-0,49	-0,17	-0,76	-0,78	-0,58	-0,80	-0,14	-0,77	-0,58
Yoğunluk (g/cm^3)	-0,46	-0,13	-0,53	-0,68	-0,86	-0,68	-0,72	-0,64	-0,68	-0,88



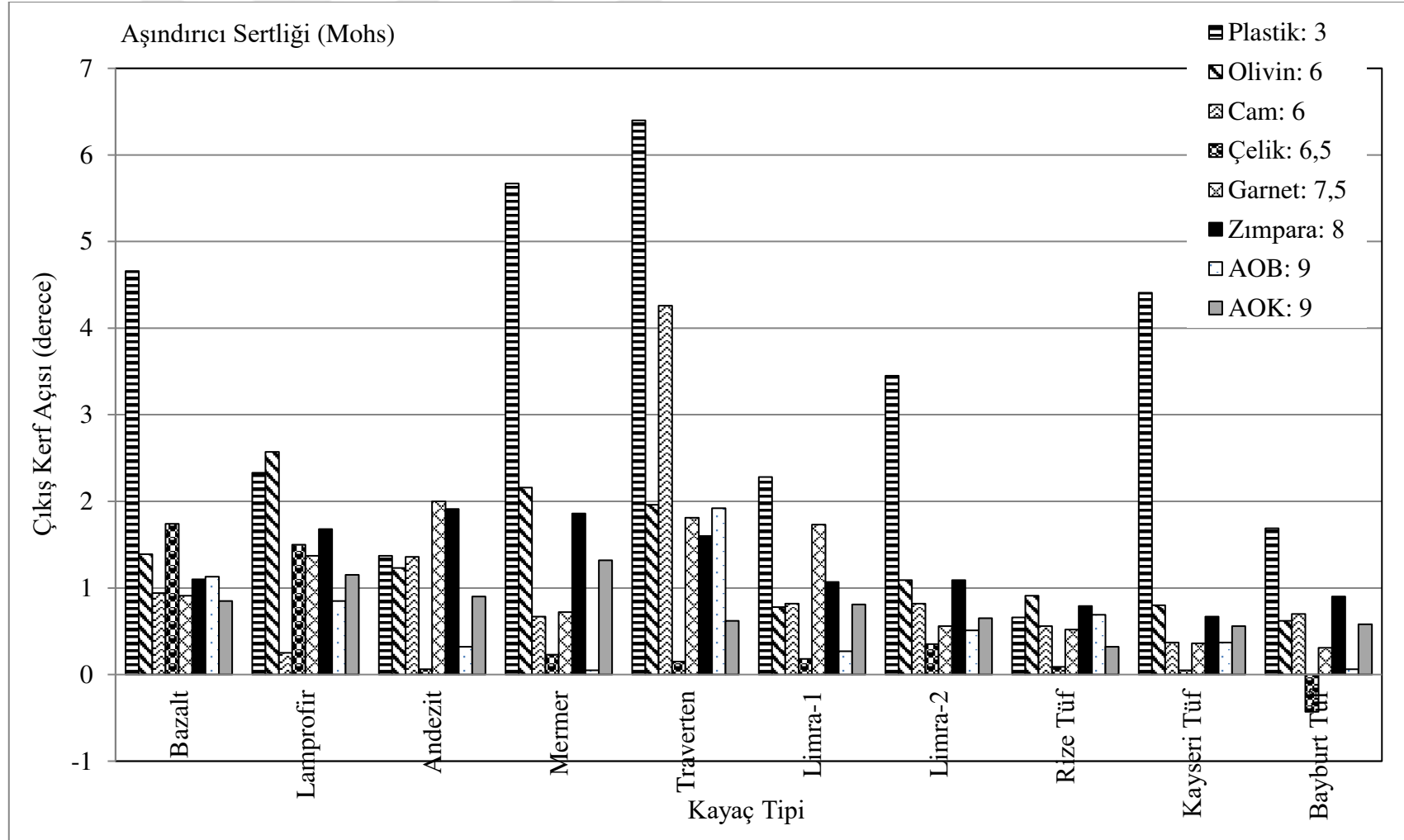
Şekil 3.40. Aşındırıcı tipine göre giriş kerf açıları



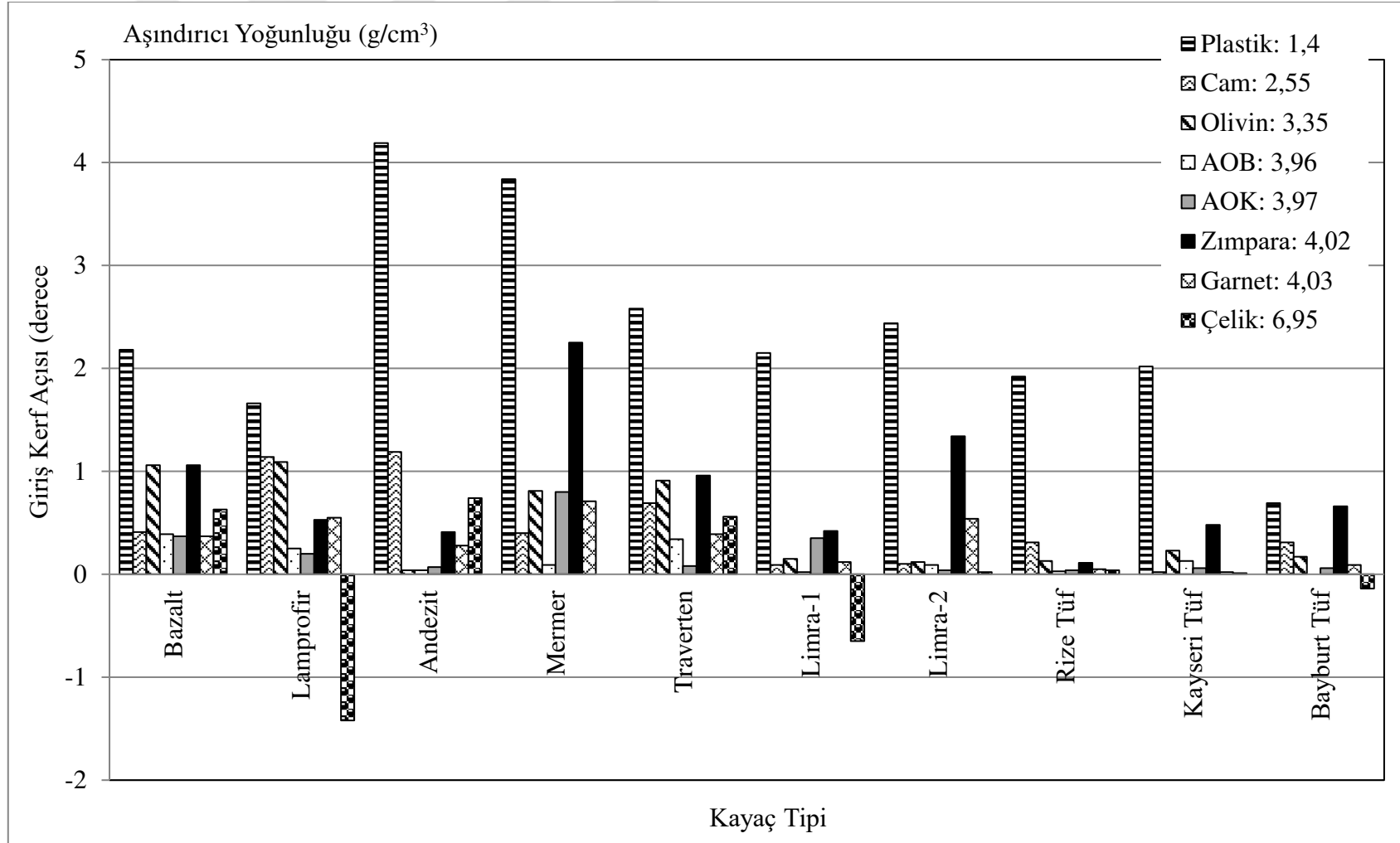
Şekil 3.41. Aşındırıcı tipine göre çıkış kerf açıları



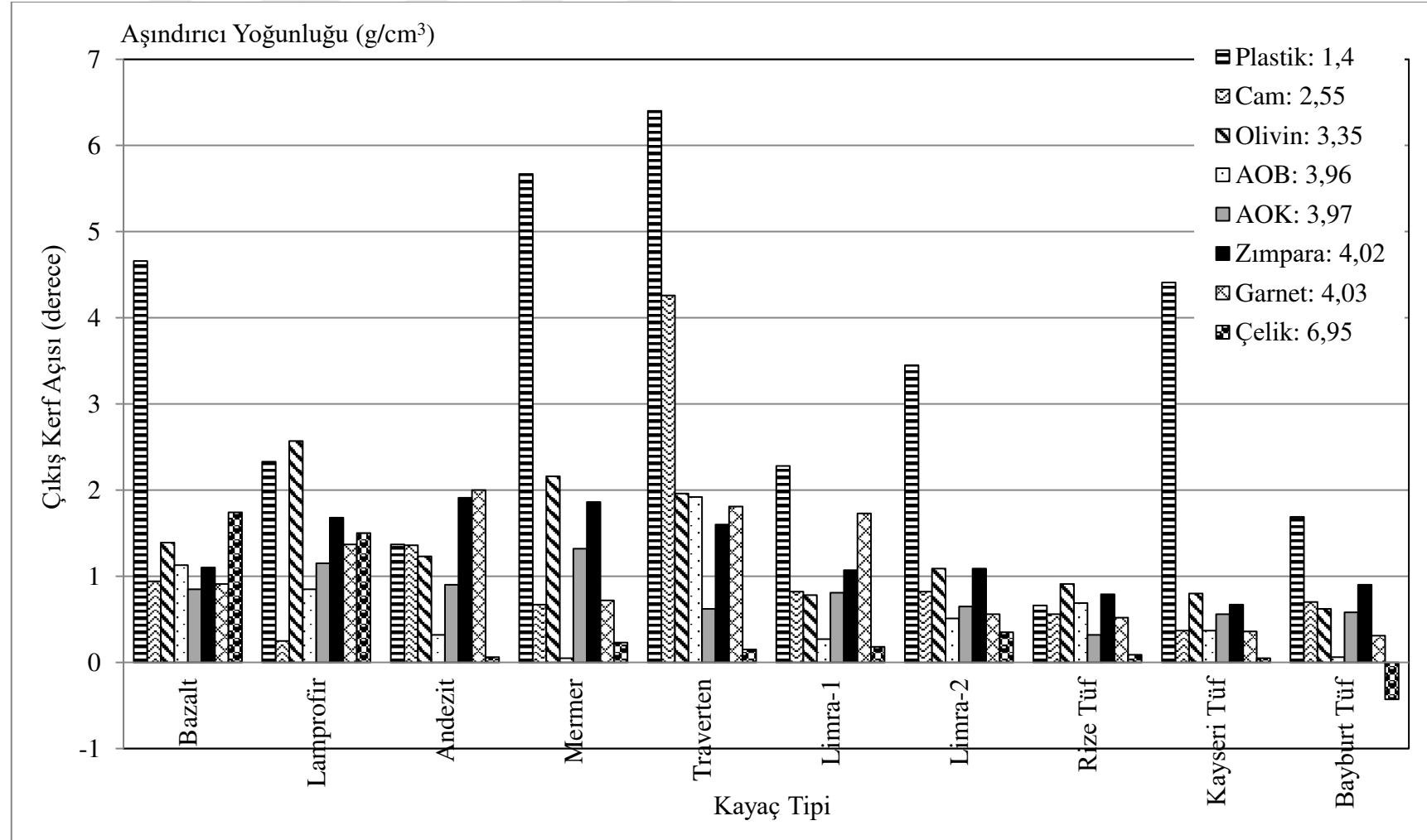
Şekil 3.42. Aşındırıcı sertliğine göre giriş kerf açıları



Şekil 3.43. Aşındırıcı sertliğine göre çıkış kerf açıları



Şekil 3.44. Aşındırıcı yoğunluğuna göre giriş kerf açıları



Şekil 3.45. Aşındırıcı yoğunluğuna göre çıkış kerf açıları

Genel olarak daha yüksek sertlik ve yoğunluğa sahip aşındırıcılarla mutlak değeri daha küçük kerf açıları olduğu görülmektedir. Axinte vd. (2009), sert aşındırıcılarla gerçekleştirdikleri kesimlerde daha düşük kerf açıları elde etmişlerdir. Khan ve Haque (2007), yoğunluğu daha düşük aşındırıcılarla kesimde jetin bağlı mukavemet bölgesinin artan derinlikle daraldığını göstermişlerdir. Düşük yoğunluklu olan aşındırıcıların özellikle kerfin alt kısımlarında fazla miktarda parçalanmalarından dolayı darbe etkileri düşük olacağından, etkili bir kesim gerçekleştiremeyeceği, alt çentiği etkin bir şekilde işleyemeyeceği söylenebilir. Bu da daha dar bir kerf dip bölgesinin meydana gelmesine sebep olur. Bunun sonucunda ise, daha yüksek kerf açıları elde edilir. Ancak, aşındırıcıların kırılgenlik gibi özellikleri de kolay parçalanıp ufalanmalarına neden olacağı için bu durum üzerinde etkili olabilir. Örneğin cam, kolay kırılabilen yüksek kerf açılarına neden olabilir. Çalışmanın sonuçlarıyla benzer şekilde, Aydın vd., (2019) tarafından aşındırıcıların yoğunluk ve sertliklerinin kerf açıları üzerinde etkili olduğu (ters ilişki) ortaya konulmuştur.

3.4.1.2. Kayaç Özelliklerinin Kerf Açılara Etkileri

Kayaç tipine göre kerf açıları ise Şekil 3.46 ve 3.47’de gösterilmektedir. Elde edilen kerf açısı değerlerine göre kayaçlar köken olarak net şekilde ayrılmasa da genel olarak Tüf ve Limra türü kayaçlarda, diğerlerine nazaran biraz daha düşük değerler elde edildiği söylenebilir. Aşındırıcı tipine göre, ortalama olarak mutlak değeri en düşük kerf açıları (giriş ve çıkış) Bayburt Tüf’te ($0,00^{\circ}$ - $1,69^{\circ}$) görülmektedir. En yüksek değerler ise giriş kerf açısında mermerden ($0,00^{\circ}$ - $3,84^{\circ}$); çıkış kerf açısında ise travertenden ($0,15^{\circ}$ - $6,40^{\circ}$) ölçülmüştür.

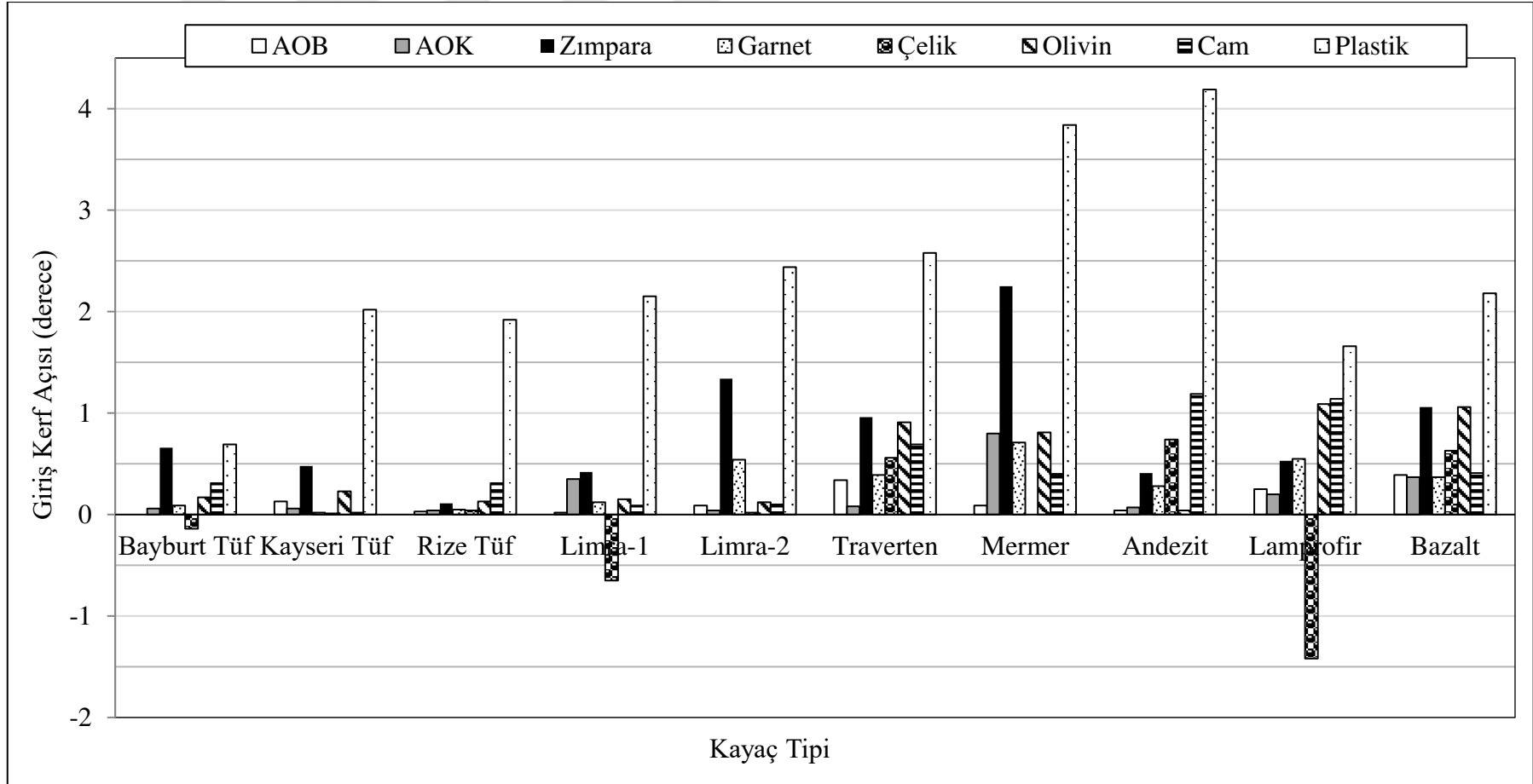
Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri temelinde kerf açıları ise Şekil 3.48-3.61’de verilmektedir. Tablo 3.27 ve 3.28’de de kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleriyle kerf açıları arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

Tablo 3.27. Giriş kerf açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

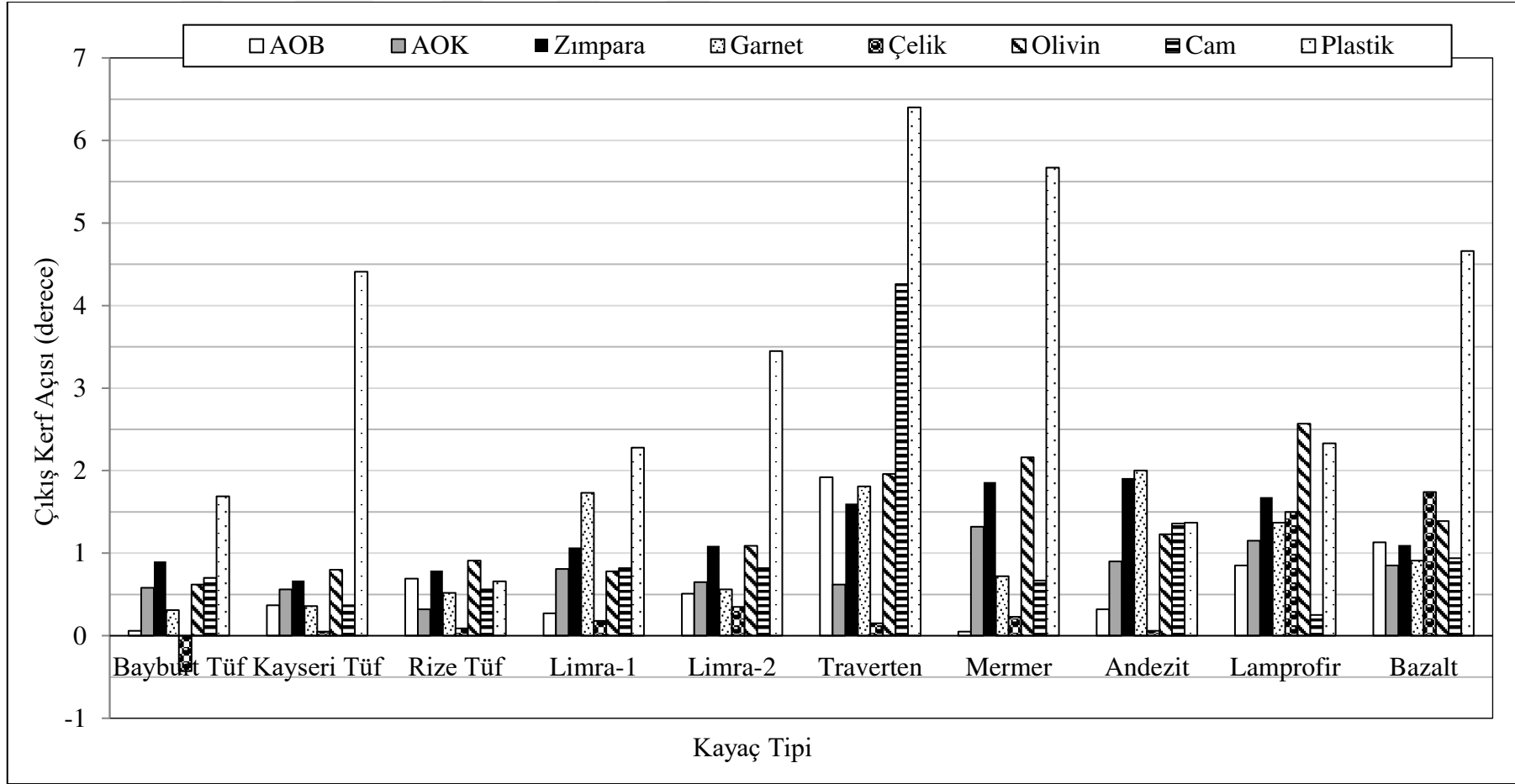
Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	-0,71	-0,53	-0,53	0,57	0,68	0,73	0,84	0,85	0,77	0,42
AOK	-0,42	-0,63	-0,56	0,63	0,31	0,31	0,28	0,23	0,31	0,64
Zımpara	-0,32	-0,55	-0,47	0,52	0,28	0,36	0,15	0,12	0,33	0,65
Garnet	-0,64	-0,75	-0,71	0,79	0,53	0,59	0,48	0,51	0,69	0,85
Çelik	-0,04	-0,07	-0,06	-0,06	0,01	0,15	0,03	-0,11	-0,14	-0,14
Olivin	-0,81	-0,66	-0,61	0,71	0,72	0,73	0,82	0,87	0,86	0,67
Cam	-0,72	-0,37	-0,35	0,36	0,61	0,59	0,52	0,58	0,47	0,29
Plastik	-0,41	-0,65	-0,65	0,54	0,37	0,46	0,15	0,08	0,04	0,43

Tablo 3.28. Çıkış kerf açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

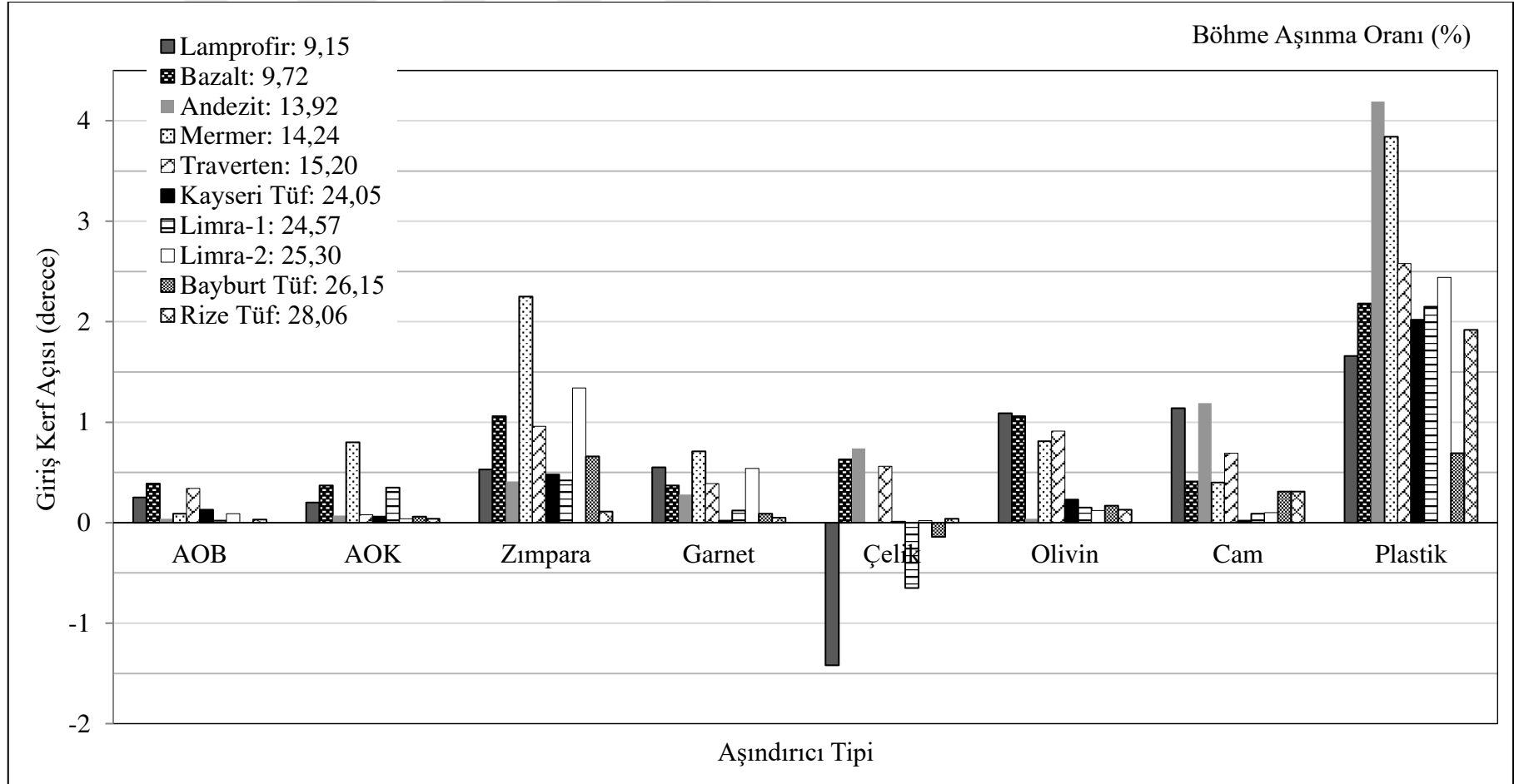
Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı (cm ³ /50 cm ²)	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	-0,40	-0,42	-0,43	0,39	0,34	0,42	0,52	0,58	0,55	0,35
AOK	-0,73	-0,67	-0,62	0,70	0,68	0,65	0,49	0,49	0,49	0,66
Zımpara	-0,74	-0,74	-0,68	0,66	0,64	0,68	0,40	0,43	0,43	0,69
Garnet	-0,50	-0,57	-0,58	0,46	0,44	0,46	0,29	0,33	0,18	0,39
Çelik	-0,71	-0,47	-0,52	0,66	0,59	0,58	0,92	0,91	0,88	0,42
Olivin	-0,80	-0,77	-0,73	0,80	0,72	0,73	0,65	0,74	0,77	0,81
Cam	-0,21	-0,40	-0,35	0,20	0,20	0,32	0,07	0,12	0,10	0,33
Plastik	-0,40	-0,59	-0,54	0,49	0,52	0,60	0,32	0,32	0,31	0,51



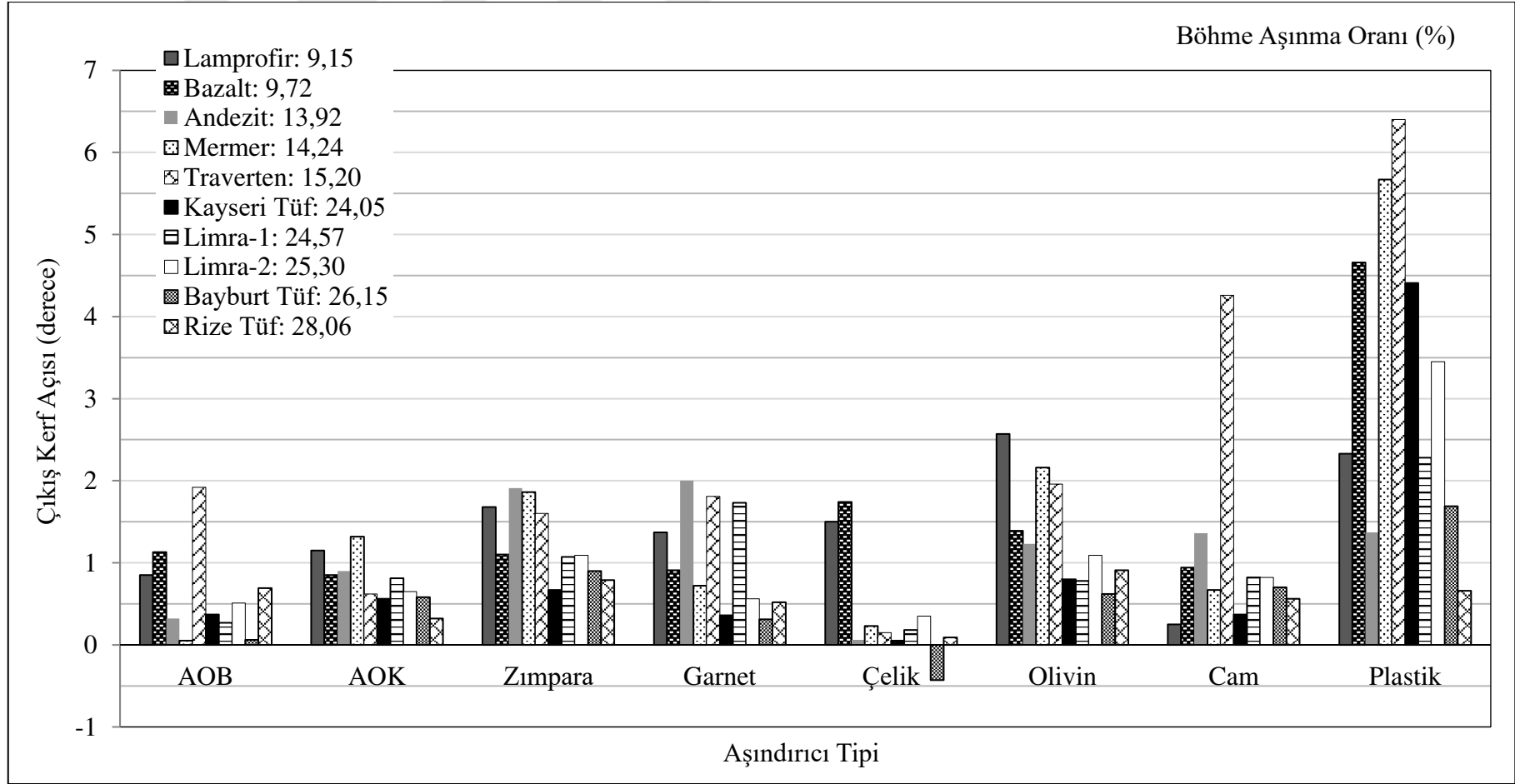
Şekil 3.46. Kayaç tipine göre giriş kerf açıları



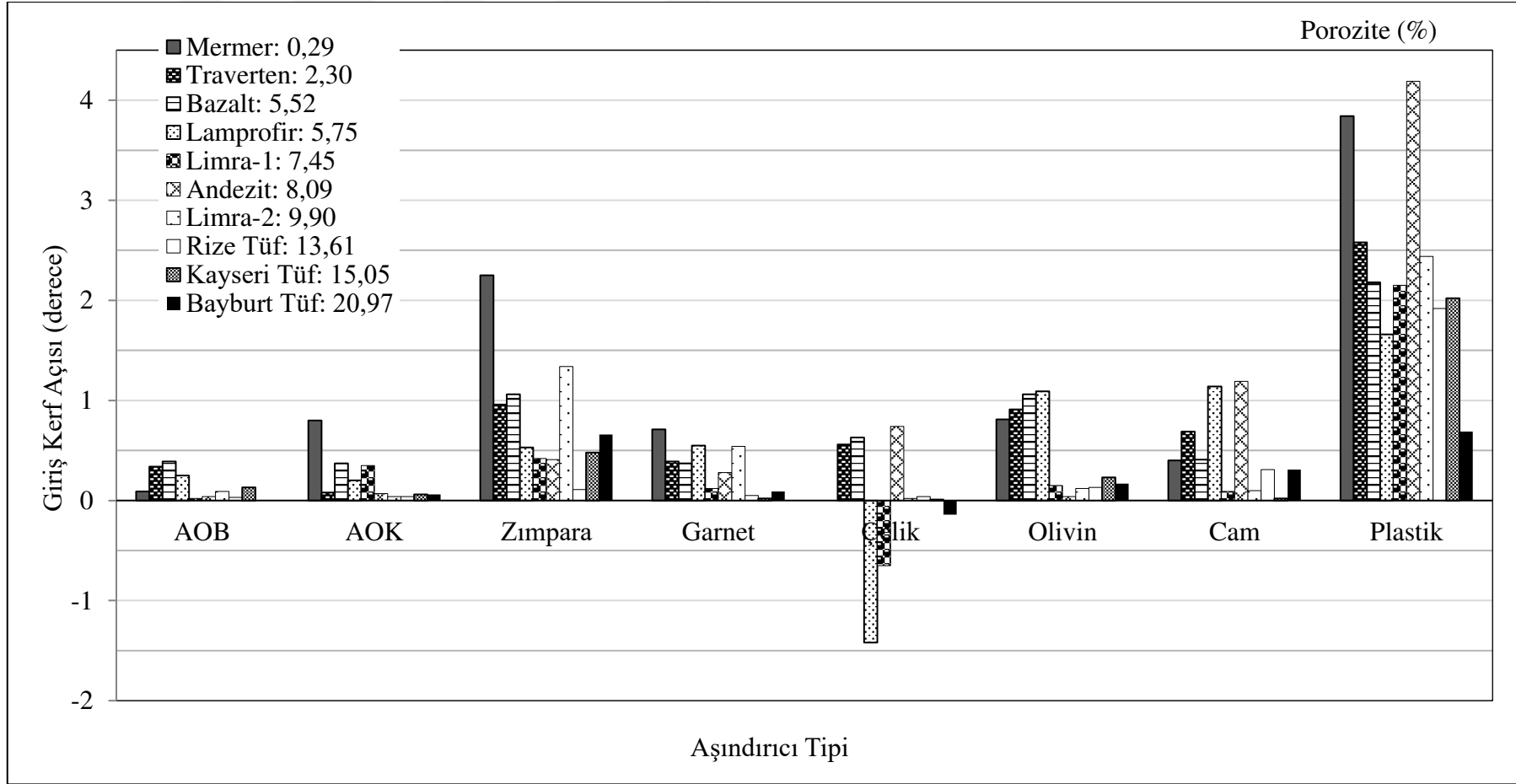
Şekil 3.47. Kayaç tipine göre çıkış kerf açıları



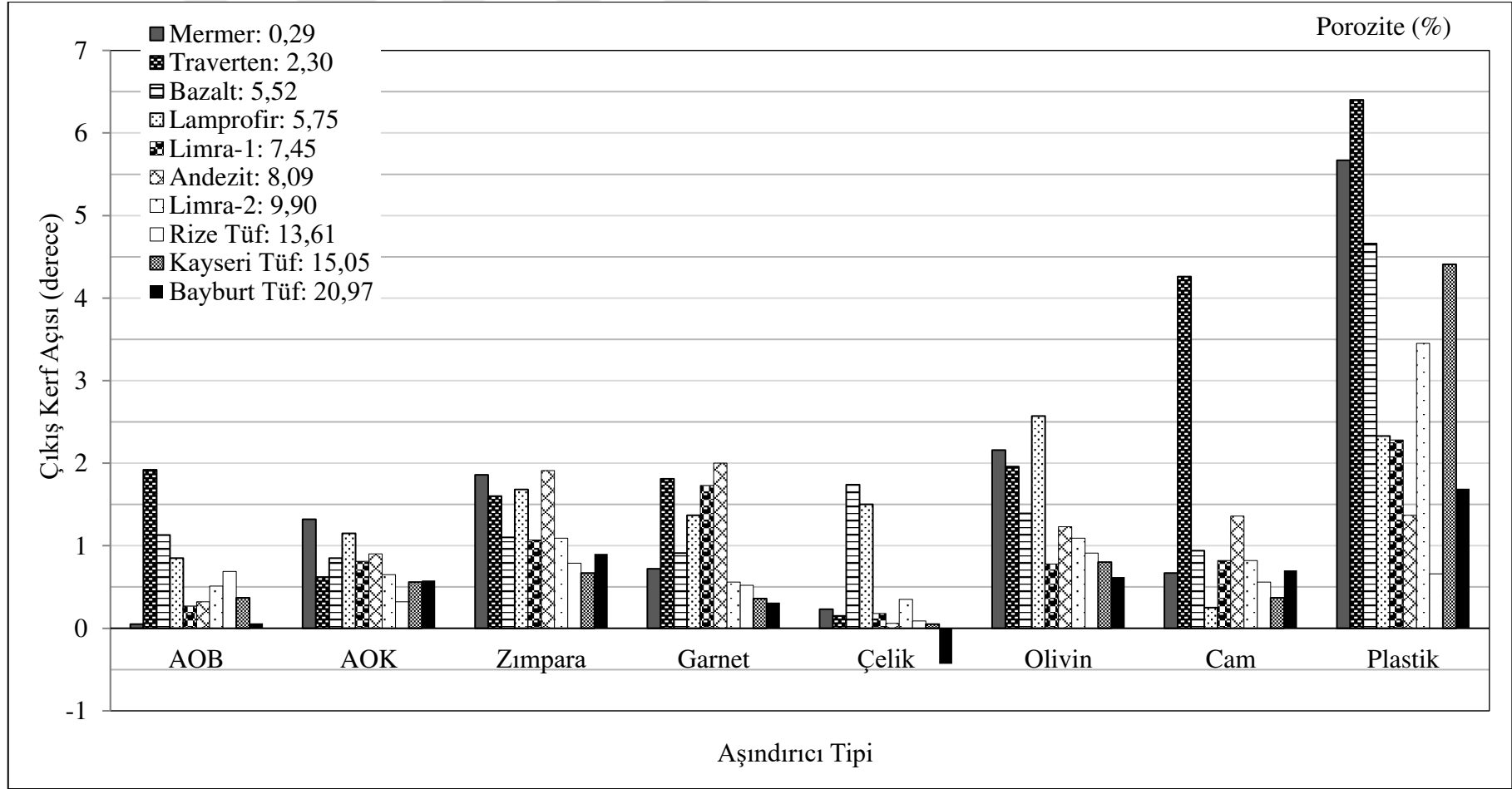
Şekil 3.48. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre giriş kerf açıları



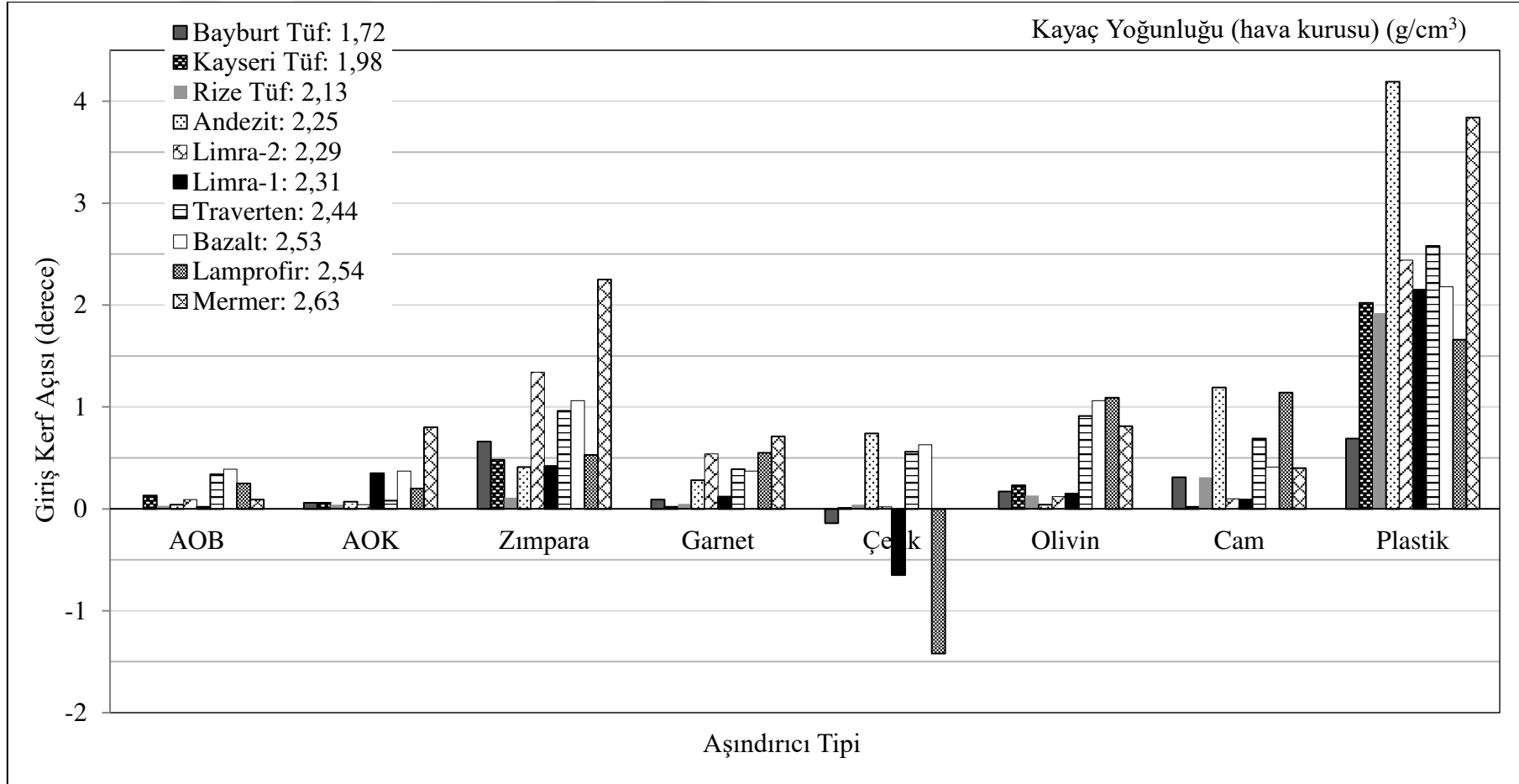
Şekil 3.49. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre çıkış kerf açıları



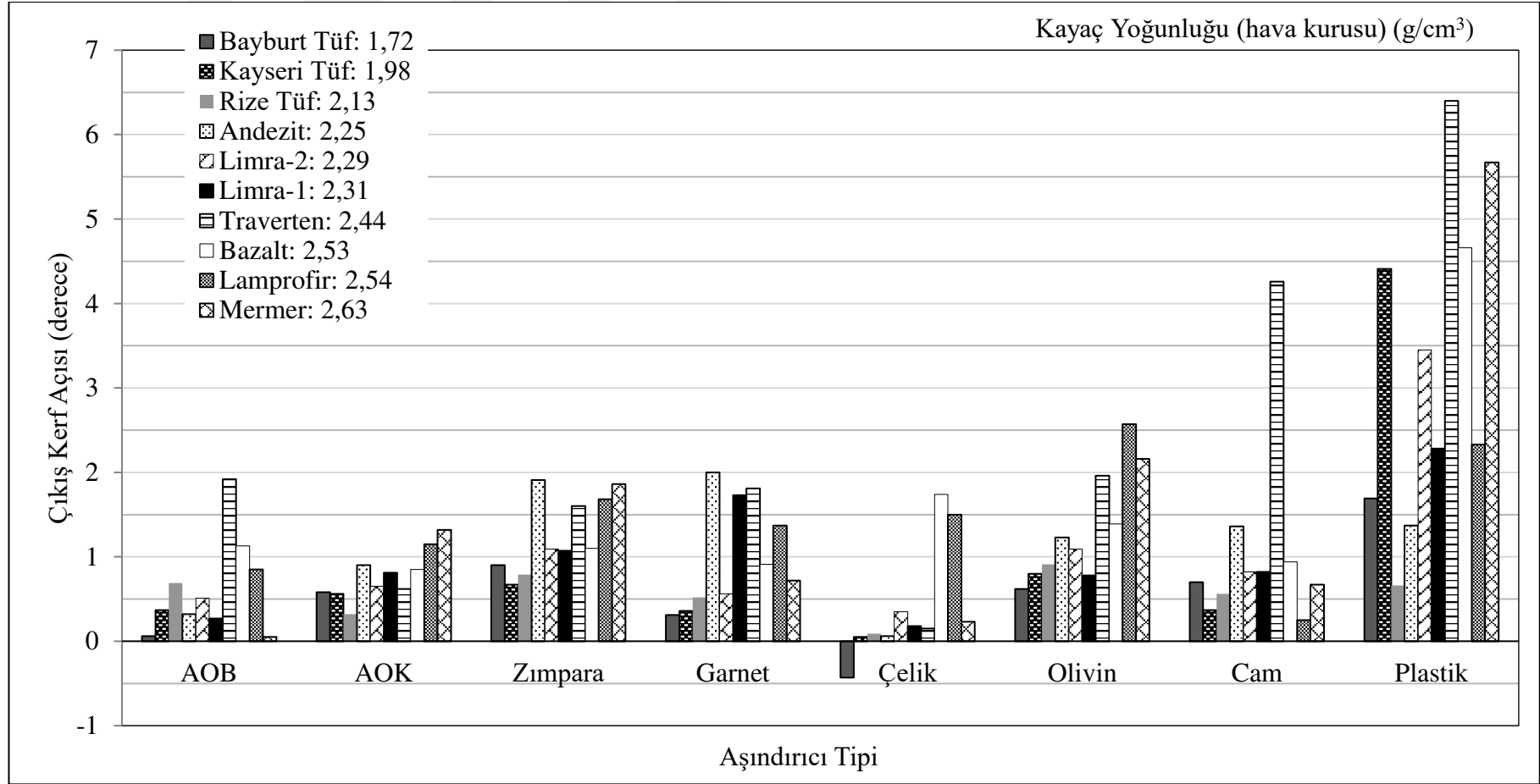
Şekil 3.50. Kayaçların porozitelerine göre giriş kerf açıları



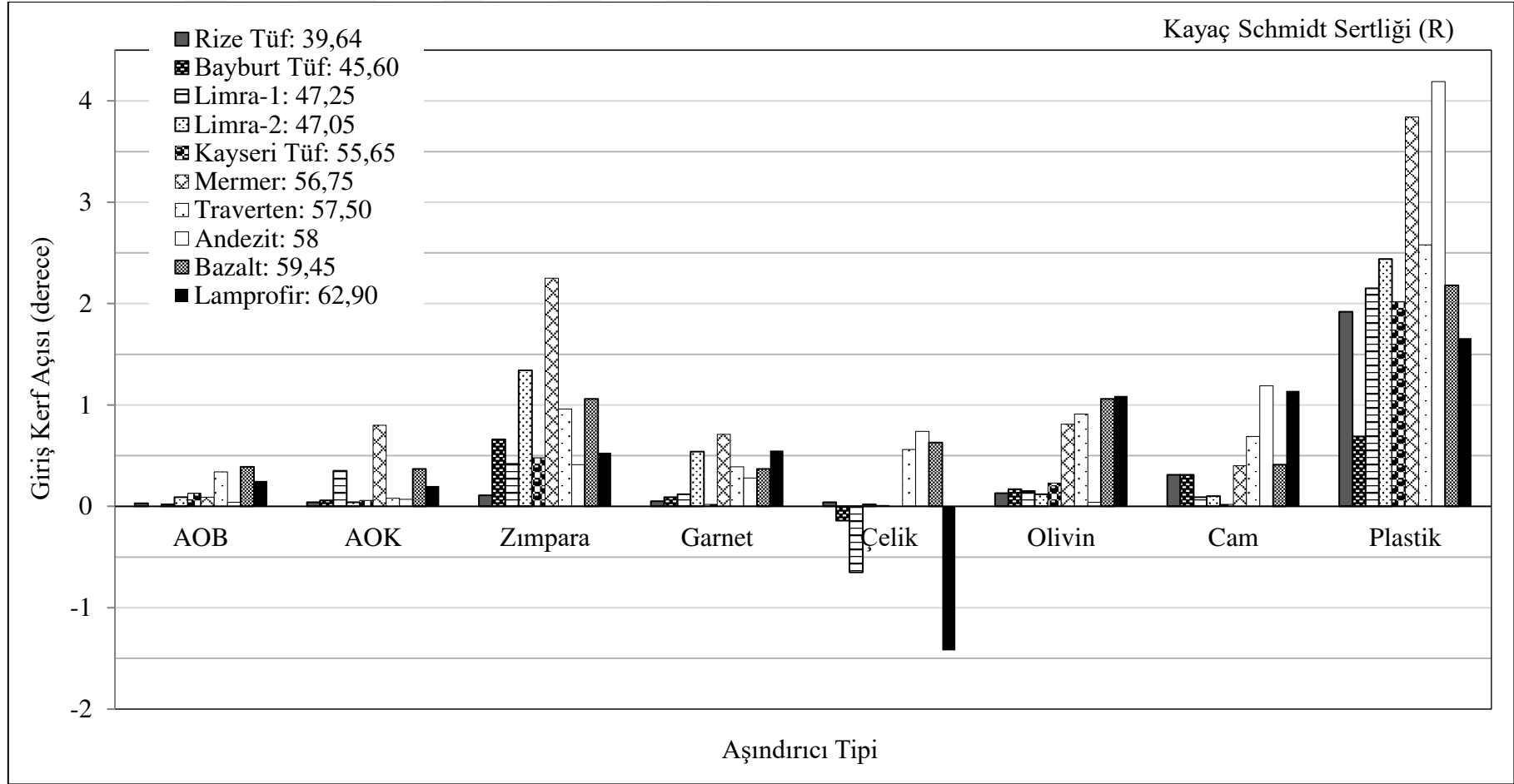
Şekil 3.51. Kayaçların porozitelerine göre çıkış kerf açıları



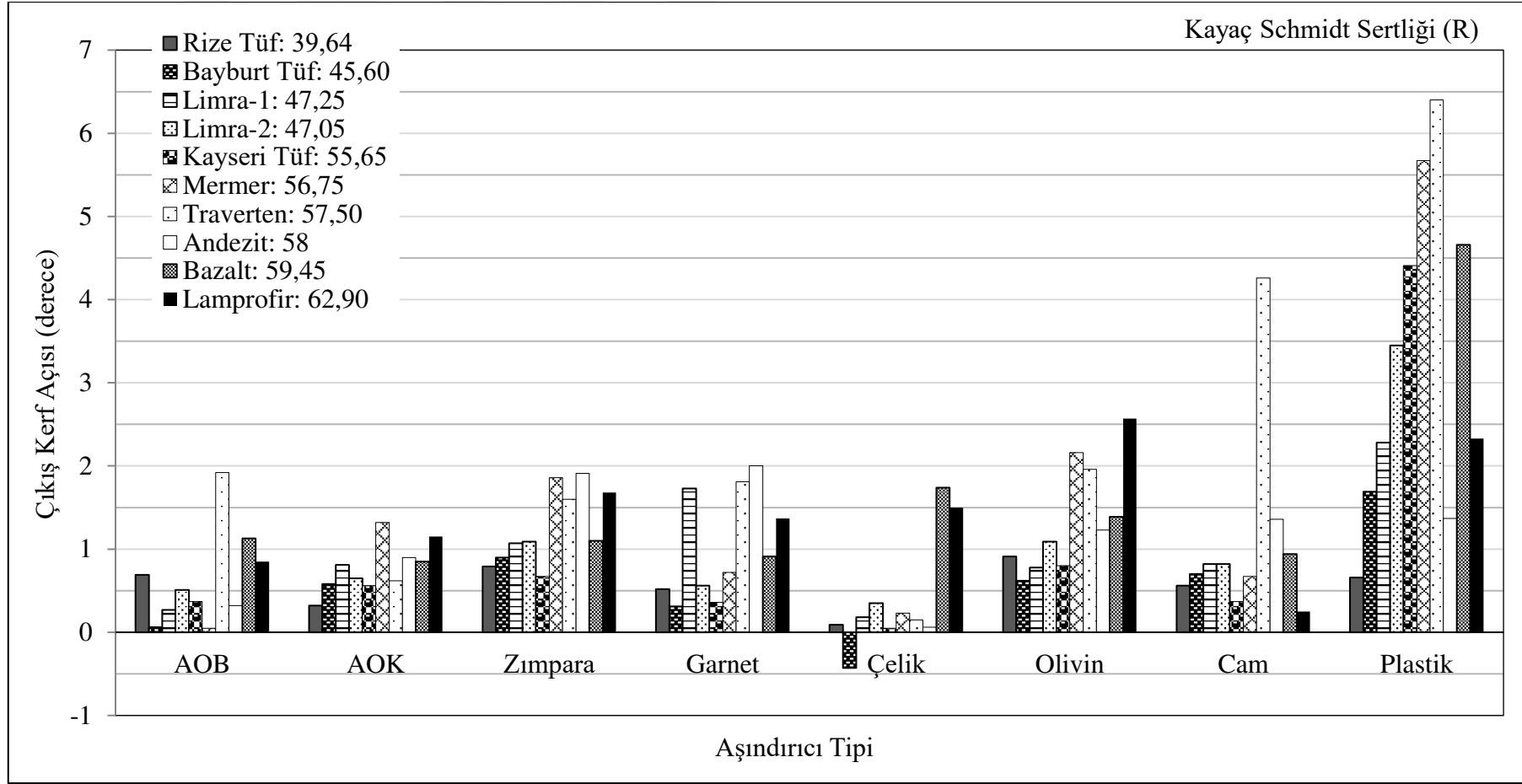
Şekil 3.52. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre giriş kerf açıları



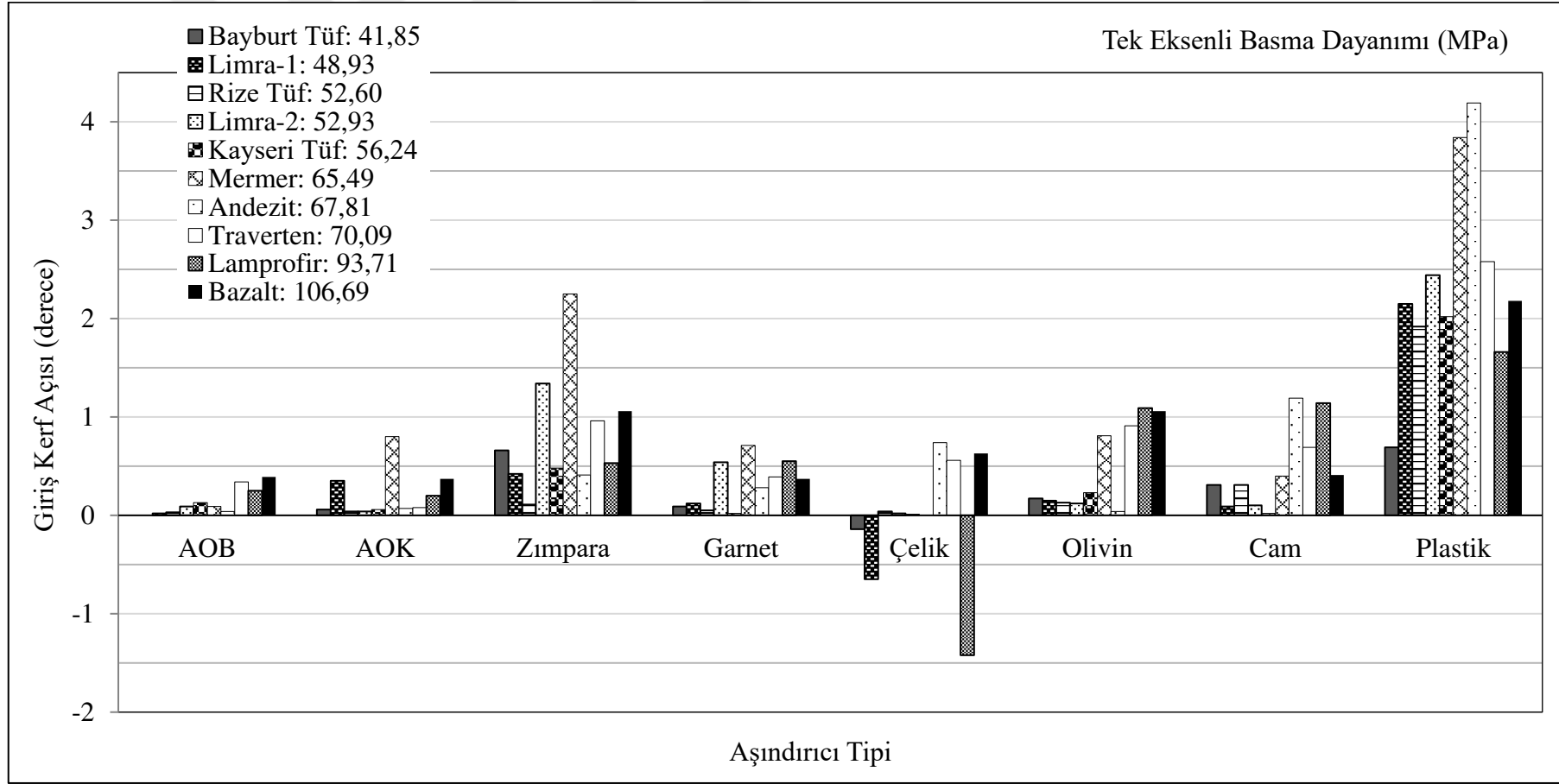
Şekil 3.53. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre çıkış kerf açıları



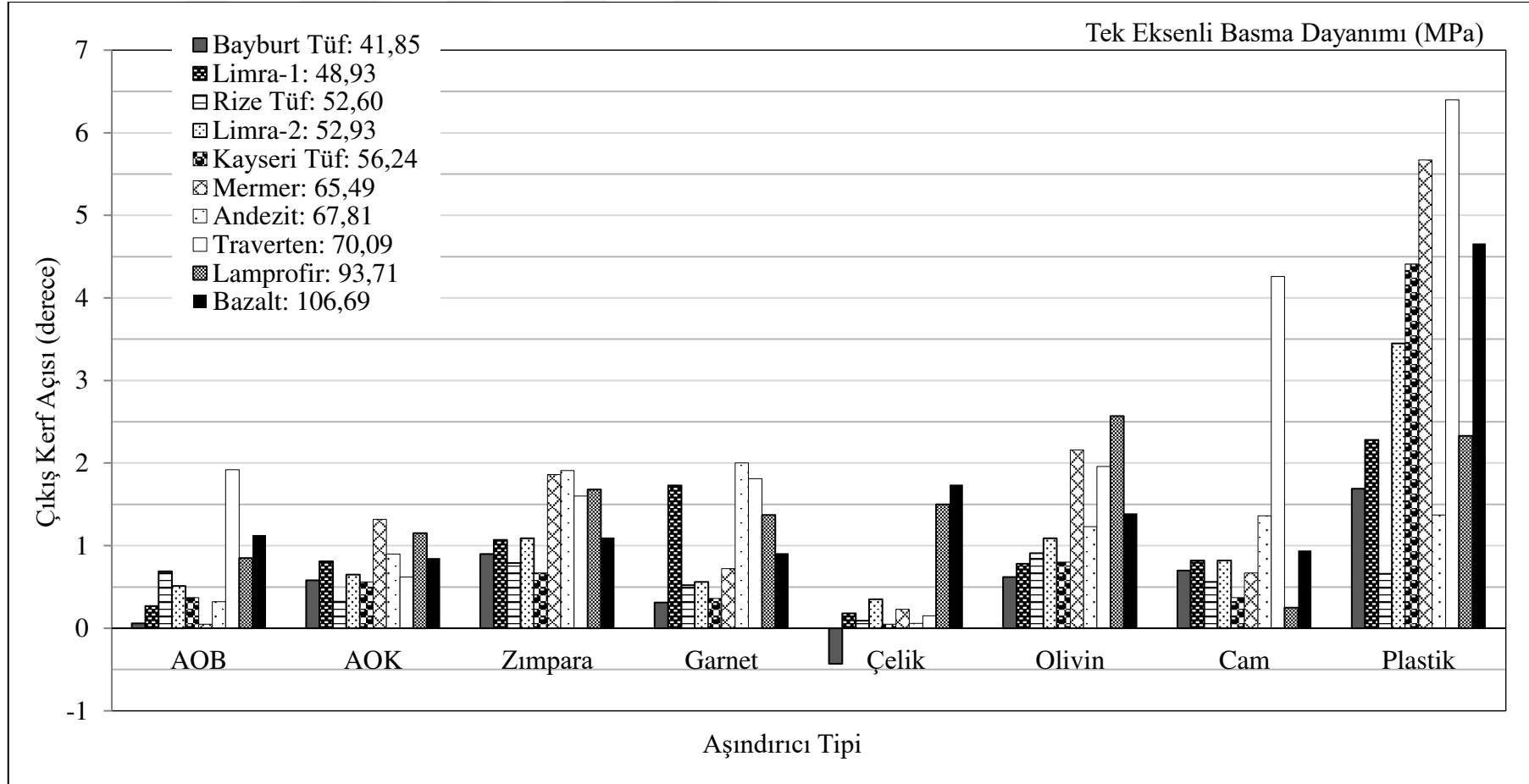
Şekil 3.54. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre giriş kerf açıları



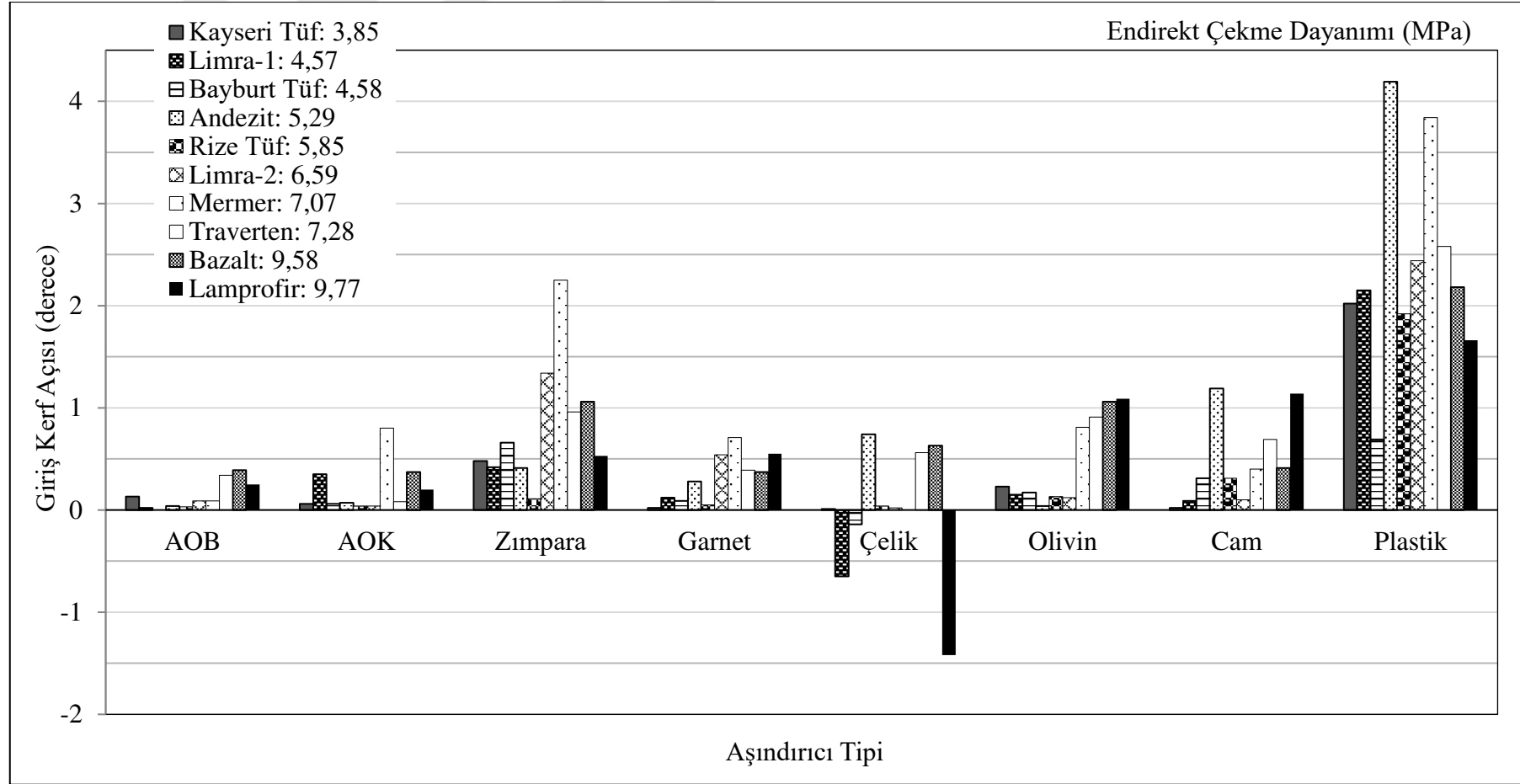
Şekil 3.55. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre çıkış kerf açıları



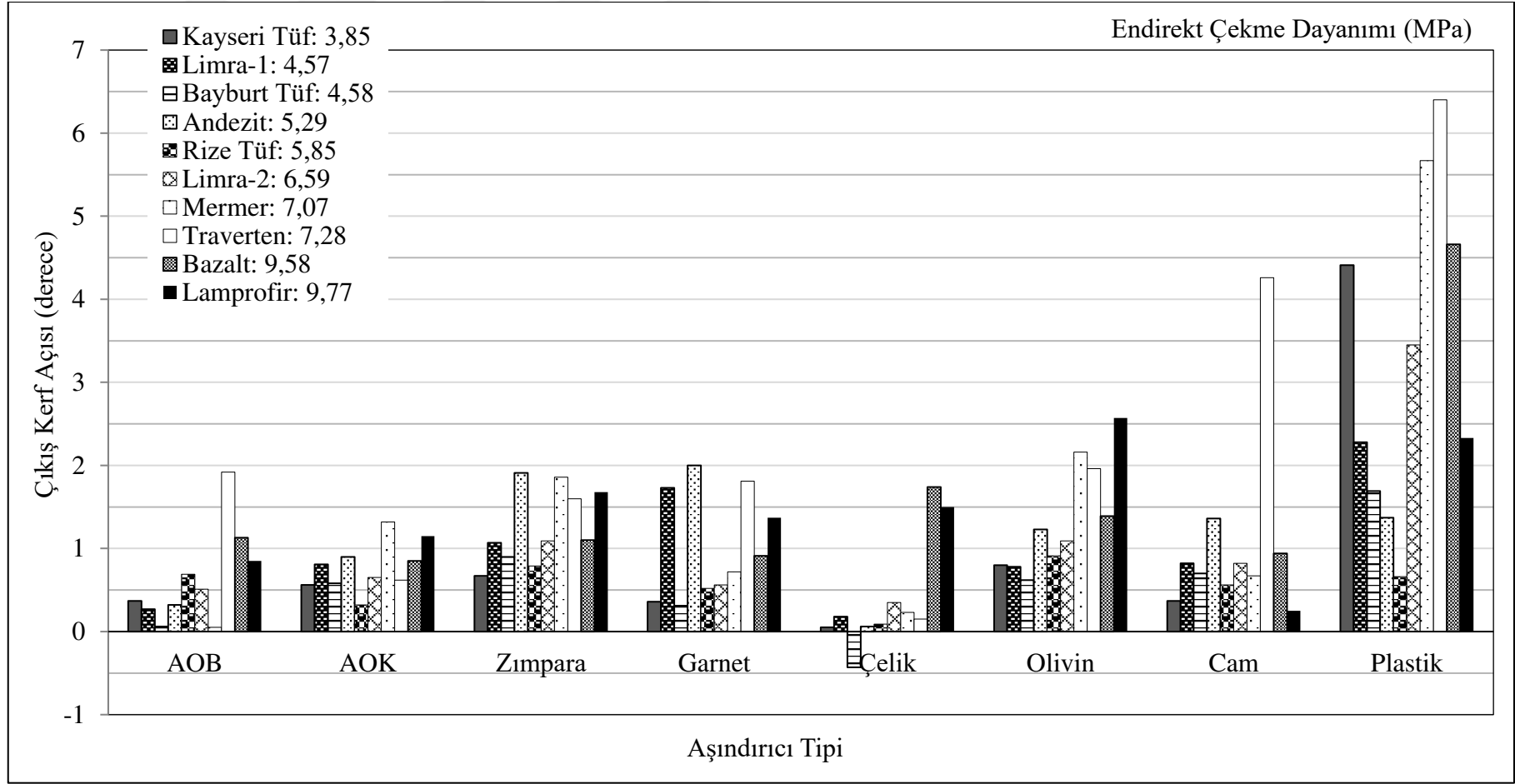
Şekil 3.56. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre giriş kerf açıları



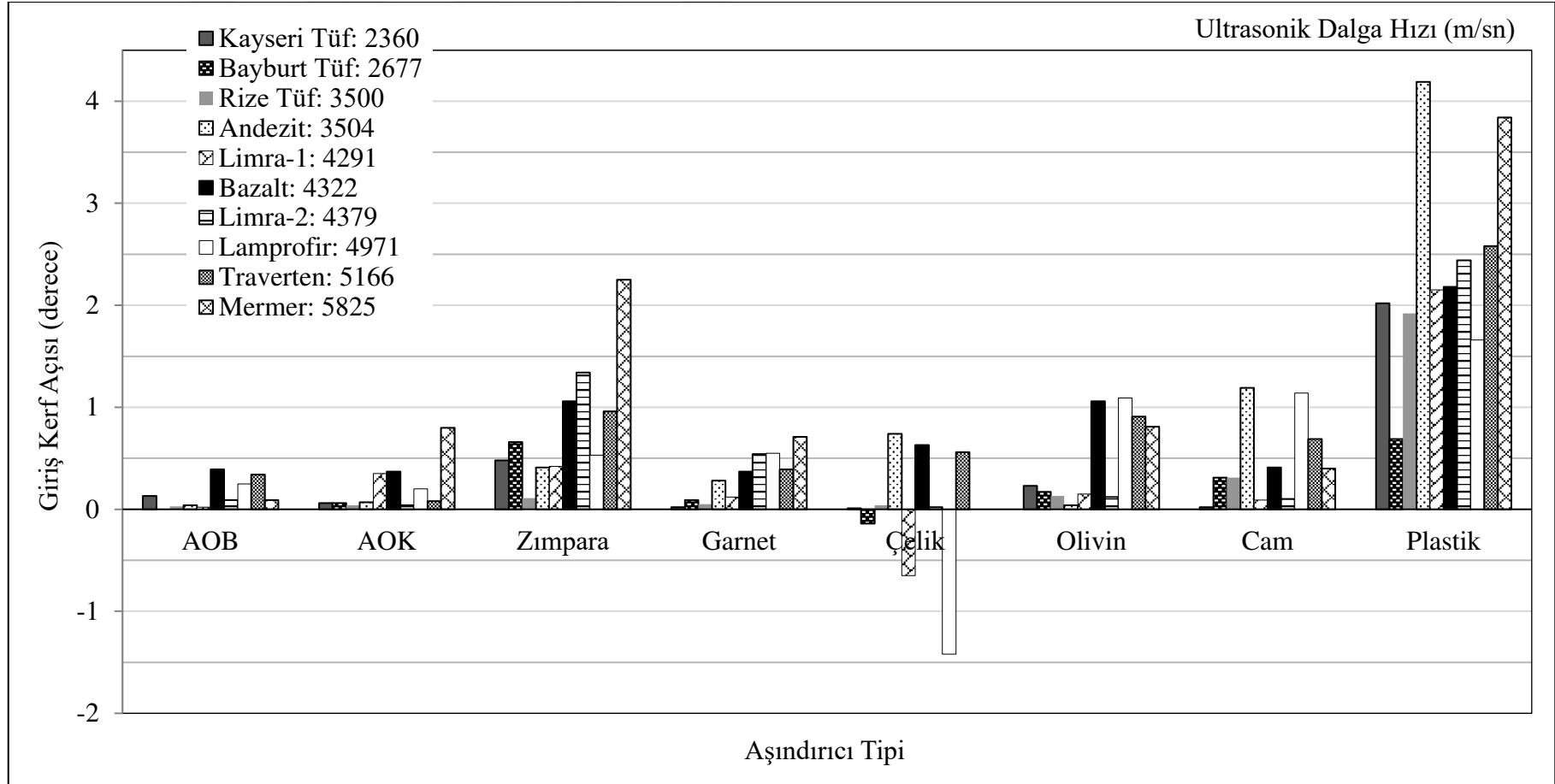
Şekil 3.57. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre çıkış kerf açıları



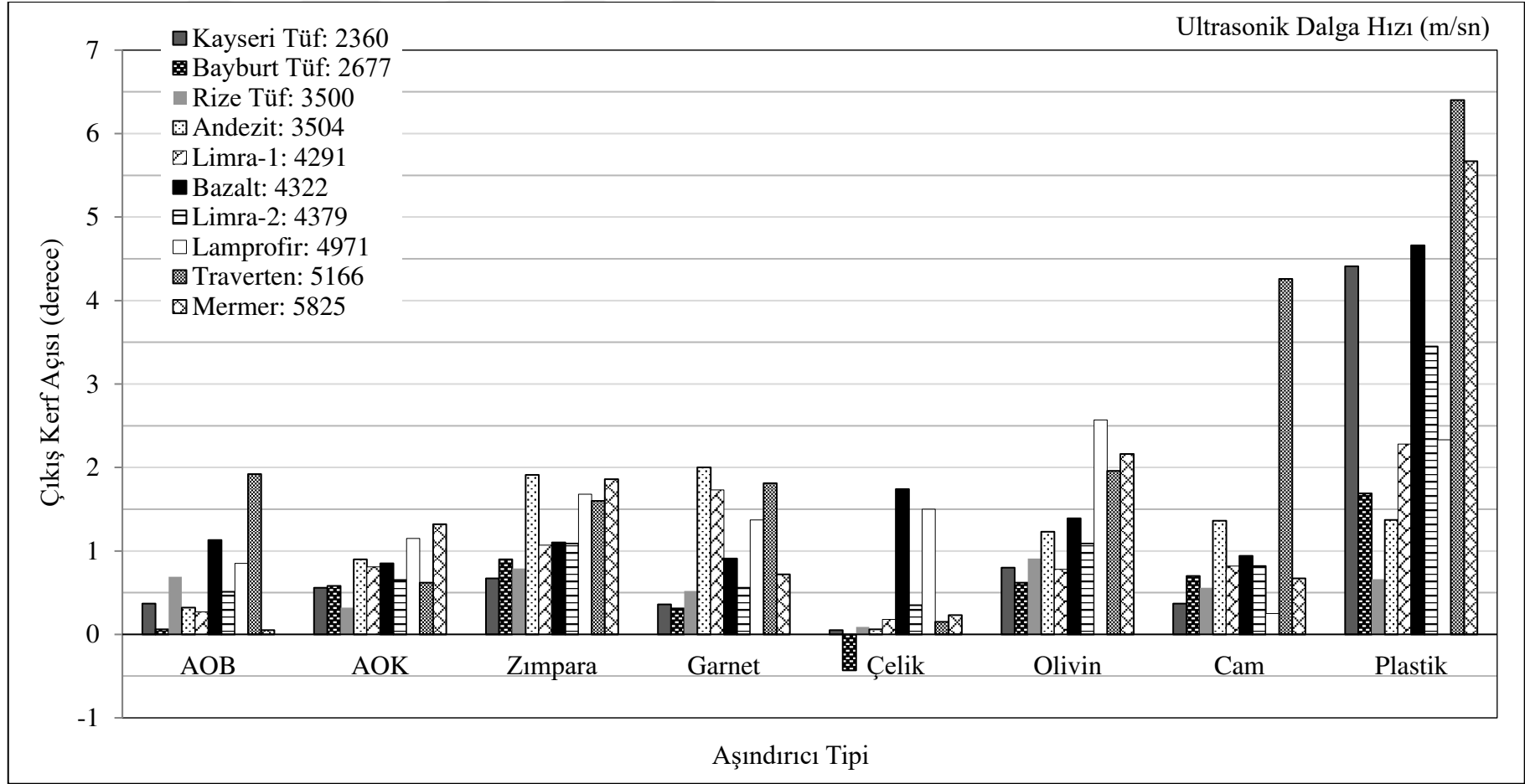
Şekil 3.58. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre giriş kerf açıları



Şekil 3.59. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre çıkış kerf açıları



Şekil 3.60. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre giriş kerf açıları



Şekil 3.61. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre çıkış kerf açıları

Genel olarak (çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerdeki giriş kerf açıları haricinde) kayaçların Böhme aşınma kaybı, poroziteleri ve su emme oranlarıyla kerf açıları arasında ters orantılı; yoğunluk, Schmidt sertliği, dayanım ve ultrasonik hız değerleriyle ise doğru orantılı ilişkiler görülmektedir. Ancak korelasyon katsayıları çok düşükten çok yükseğe çeşitlilik arz etmektedir. Kerf açısının; kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranının kayaç özellikleriyle ilişkilerinin tersine bir eğilim gösterdiği söylenebilir. Başka bir ifadeyle, artan kesme derinlikleri ve malzeme uzaklaştırma oranlarında daha düşük kerf açıları oluşma eğilimi görülmektedir. Ancak, çelikle elde edilen giriş kerf açıları, genel eğilimi bozmaktadır. Kolay aşınan (Böhme aşınma kaybı değeri yüksek), çok boşluklu (porozite ve su emme oranı yüksek) bir kayaç daha kolay kesilebilecektir. Başka bir ifadeyle bu tür kayaçlarda jetin enerjisi daha geç tükenecektir. Dolayısıyla oluşan kesiğin dibine doğru kesme genişliği daha yavaş azalabilecektir. Bu da eğimi daha az bir kesimin meydana gelmesi anlamına gelir (düşük kerf açısı). Kayaçların kesilmeye ve/veya aşınmaya karşı daha fazla direnç göstermesine etkisi olan yüksek yoğunluk, sertlik ve dayanım değerlerinde ise bu mekanizmanın tam tersi oluşacağından kerf açılarının artması söz konusu olabilecektir.

Karakurt vd. (2011a, 2012a) ve Aydın vd. (2012), ASJ ile kayaç kesiminde çalışma parametrelerinin yanında kayaç özelliklerinin de kerf açısını etkilediğini belirtmişlerdir. Araştırmacılar, ASJ ile granitleri kestikleri çalışmalarında kayaçların tek eksenli basma dayanımlarıyla ve mikrosertlikleriyle kerf açıları arasında ters ilişki tespit etmişlerdir. Ancak, çalışmada granit gibi iri taneli bir kayaç kullanılmıştır ve kerf açıları üzerinde mineral tane özelliklerinin etkili olabileceği belirtilmiştir.

3.4.2. Çakılma Bölgesi

Kayaç numunelerin kerf geometrilerinden ölçülen çakılma bölgesi derinlikleri (h_c) Tablo 3.29 ve 3.30'da çakılma bölgesi genişliği (W_c) değerleri ise Tablo 3.31 ve 3.32'de verilmektedir.

Çakılma bölgesi derinliklerinin 0,79-46,68 mm aralığında değiştiği görülmektedir. Ayrıca çıkışlarda elde edilen çakılma bölgesi derinlikleri, girişlerdekinden daha düşüktür. Kesme derinliği fazla olan kesimlerde çakılma bölgesi derinliği de genellikle daha fazladır. Dolayısıyla çakılma bölgesi derinliği açısından kesimlerin performansı kesme derinliğindeki bulguların tersi olacaktır. Kesme derinliğinin yüksek değerde olması iyi bir kesme performansına işaret ederken, çakılma bölgesinin derinliğinin fazla olması kesme

performansı açısından istenmeyen bir durum olarak değerlendirilebilir. En düşük çakılma bölgesi derinliği, girişte 1,14 mm ile aşındırıcı olarak plastiğin kullanıldığı mermer kesiminden, çıkışta ise 0,79 mm ile yine aynı aşındırıcının kullanıldığı bazalt kesiminden elde edilmiştir. En yüksek çakılma bölgesi derinliği ise girişte 46,68 mm ve çıkışta 15,93 mm ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı Limra-1’de görülmüştür.

Tablo 3.29. Giriş çakılma bölgesi derinlikleri, h_c (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	10,51	22,68	19,27	13,96	15,50	9,23	11,03	2,00
Lamprofir	6,83	8,29	14,44	20,42	9,85	11,75	7,14	5,02
Bazalt	16,81	22,19	11,35	21,78	16,24	15,14	10,50	7,40
Mermer	19,15	9,57	13,97	17,17	8,74	13,70	8,48	1,14
Traverten	8,21	27,72	16,80	27,95	14,73	7,63	9,94	3,06
Limra-1	19,53	17,13	11,88	46,68	34,28	5,35	31,52	8,29
Limra-2	16,98	11,64	17,44	24,27	13,15	19,94	15,13	7,72
Kayseri Tüf	24,50	18,01	36,75	32,86	21,73	11,46	21,11	8,80
Rize Tüf	25,06	17,08	19,03	32,10	24,93	22,20	20,10	9,50
Bayburt Tüf	32,66	28,52	31,44	36,09	29,49	21,50	20,31	17,16

Tablo 3.30. Çıkış çakılma bölgesi derinlikleri, h_c (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	4,07	6,03	5,26	5,77	3,91	1,26	5,71	5,66
Lamprofir	2,85	4,84	2,61	5,46	3,25	1,39	4,07	3,32
Bazalt	4,27	2,93	2,52	15,04	5,10	1,95	4,52	0,79
Mermer	3,96	12,48	4,63	7,47	2,02	3,06	3,75	1,05
Traverten	2,49	4,60	2,64	9,57	5,30	3,61	3,65	1,48
Limra-1	9,18	10,91	4,74	15,93	8,30	5,34	7,69	4,17
Limra-2	2,38	5,98	6,58	9,49	3,29	4,41	6,30	1,74
Kayseri Tüf	2,93	6,97	10,41	13,40	4,10	4,12	7,95	4,57
Rize Tüf	5,35	5,79	8,84	9,50	7,99	5,41	5,64	4,45
Bayburt Tüf	3,05	10,20	11,83	9,12	5,70	3,10	5,30	3,73

Çakılma bölgesi genişliklerinin nispeten sınırlı bir aralıkta değerler aldığı görülse de bu aralığın kesme genişliklerine göre biraz daha geniş olduğu söylenebilir (0,34-7,13 mm). Çakılma bölgesi derinliklerinde olduğu gibi genişlik değerlerinde de girişteki ölçümler çıkıştakilerden genel itibarıyla biraz daha yüksektir. En düşük çakılma bölgesi genişliği değerleri, girişte 1,01 mm ile plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı andezit kesiminden, çıkışta ise 0,34 mm ile yine aynı aşındırıcının kullanıldığı bazalt kesiminden elde edilmiştir.

En geniş çakılma bölgeleri ise girişte 7,13 mm ile çeliğin aşındırıcı olarak kullanıldığı Kayseri Tüf'te ve çıkışta 2,65 mm ile yine aynı aşındırıcının kullanıldığı bazaltta görülmüştür.

Tablo 3.31. Giriş çakılma bölgesi genişlikleri, W_{ϕ} (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	2,33	4,14	3,47	2,21	2,64	1,93	3,02	1,01
Lamprofir	1,82	1,70	3,63	4,63	1,29	2,51	2,58	3,36
Bazalt	1,74	2,84	2,54	3,72	2,05	1,49	2,10	3,20
Mermer	2,62	1,73	2,46	4,88	1,61	2,36	2,42	1,15
Traverten	2,68	2,20	3,91	4,69	2,25	1,78	3,84	1,55
Limra-1	1,89	2,37	2,06	5,30	2,43	1,55	6,81	3,64
Limra-2	1,77	2,83	1,74	6,71	2,52	2,28	3,28	1,62
Kayseri Tüf	2,79	2,96	2,56	7,13	3,50	2,47	2,95	1,99
Rize Tüf	3,41	3,48	2,92	3,45	3,63	2,90	4,30	1,79
Bayburt Tüf	2,73	2,20	2,93	3,32	2,29	2,70	2,95	3,17

Tablo 3.32. Çıkış çakılma bölgesi genişlikleri, W_{ϕ} (mm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	1,28	1,25	0,96	1,90	1,10	0,54	2,07	1,70
Lamprofir	0,94	0,84	0,73	1,29	1,14	0,61	1,22	1,35
Bazalt	0,83	0,57	0,42	2,65	0,40	0,57	1,10	0,34
Mermer	0,84	1,18	0,99	1,49	0,65	0,79	1,72	0,63
Traverten	0,90	0,82	0,84	2,07	0,98	0,75	1,19	1,06
Limra-1	0,85	1,26	0,53	2,41	0,99	0,92	1,38	1,14
Limra-2	0,53	0,92	0,70	2,00	0,50	0,65	1,37	0,70
Kayseri Tüf	1,05	0,80	1,05	2,20	0,70	0,71	1,52	0,77
Rize Tüf	0,82	0,43	1,10	2,10	0,84	1,07	1,50	1,13
Bayburt Tüf	1,05	0,81	0,69	1,24	0,39	0,52	0,92	0,91

Çakılma bölgesi derinliği kesme derinliğiyle yakından ilişkili olarak görülürken aynı durum çakılma bölgesi genişliğiyle kesme genişliği arasında tam olarak söylenemez. Jet, kesim işleminde kesilen kayaç numunesinde derinlere doğru ilerlerken bir noktadan sonra kinetik enerjisini kaybetmeye başlayacak ve tamamen tükettiğinde kesebileceği maksimum derinliğe ulaşacaktır. Ancak bu süreçte kesme derinliği kesilen numunenin kalınlığından az olursa kesimin dip noktasında akışkan jet çıkış bulamadığı için geri yansıyacak ve türbülanslar oluşturarak düzensiz geometrili çakılma bölgesini meydana getirebilecektir. Dolayısıyla kinetik enerjisi daha yüksek olan akışkanın bu enerjiyi tüketme süresi daha fazla

olacağından, oluşacak çakılma bölgesinin boyutlarının daha fazla olacağı beklenilebilir. Yüksek kinetik enerjili akışkanların kesme derinliği daha fazla olacağından, çakılma bölgesinin de daha derin olması bu olguyla açıklanabilir. Ancak, kesme genişliği değerleri yalnızca kesimin ilk başladığı üst bölgelerden ölçüldüğü ve derinlere doğru kesme genişliği değiştiği için kesme genişliğiyle çakılma bölgesi genişliği arasında benzer bir ilişki oluşmayabilir. Genel olarak; aynı numune için giriş çakılma bölgesi derinlikleri çıkıştakilerden daha yüksek ölçülmüştür. Jet, numune üst yüzeyine temas ettiği anda kesme yönü doğrultusunda numune yan duvarına da (giriş kerf profilinin olduğu kısım) temas eder. Dolayısıyla numune, yüzeyine jetin dik darbesiyle birlikte giriş duvarına yanal darbe de alır (kesimin ilerleme yönüne paralel). Jet, çıkış duvarında numuneyi terk ettiğinde ise duvara gelen yanal darbe, kesimin iç bölgesinde geride kalan ve zayıflayan jetin alt kısmıdır. Çıkışta yan duvara ekstra çarpan bir jet darbesi bulunmaz. Yalnızca geride kalan türbülanslar ve kesimi tamamlayıp numuneden çıkış yapan jet, çıkış bölgesine etkir. Böylece girişteki çakılma bölgesinin derinlik ve genişlikleri çıkıştan daha fazla olabilir. (Vie 1983; Ranney 1995; Engin 2012; Karakurt vd., 2012b).

3.4.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Çakılma Bölgesine Etkileri

Çakılma bölgesi derinlikleri temelinde aşındırıcıların performansı Şekil 3.62’de görülmektedir. Şekilde farklı kayalardan elde edilen giriş ve çıkış çakılma bölgesi derinliklerinin ortalaması alınarak elde edilen değerler aşındırıcı tipine göre gruplandırılmıştır. Her kayaç kendi içerisinde değerlendirildiğinde; en yüksek çakılma bölgesi derinliği çelikle, en düşükleri ise plastikte elde edilmiştir. Şekil 3.63 ve Şekil 3.64’te sırasıyla aşındırıcıların sertliğine ve yoğunluğuna göre çakılma bölgesi derinlikleri sunulmaktadır. Tablo 3.33’te ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle çakılma bölgesi derinlikleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir.

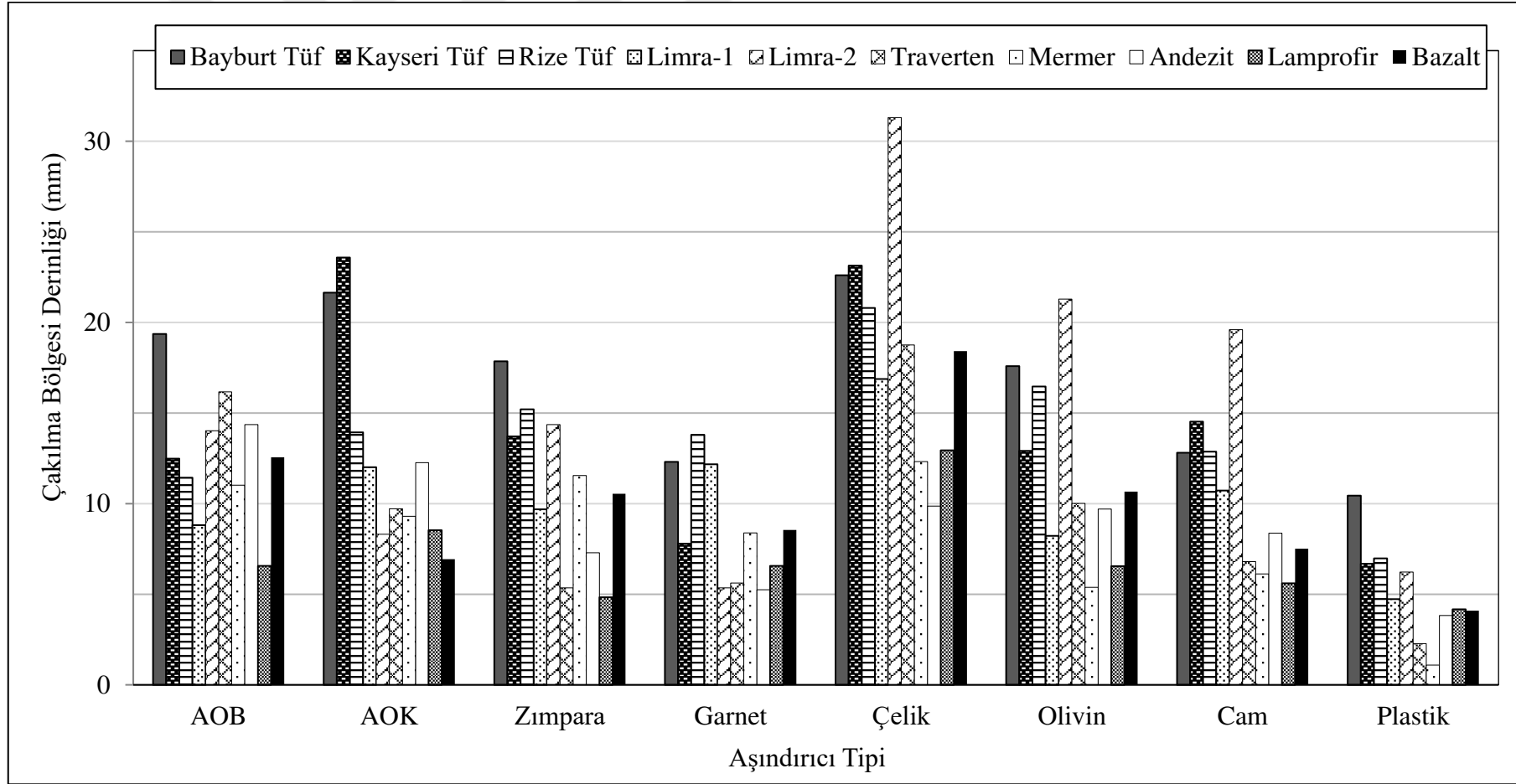
Kesme derinliklerinde olduğu gibi, daha yüksek yoğunluk ve sertliğe (Limra-2 hariç) sahip aşındırıcılarla daha yüksek çakılma bölgesi derinlikleri elde edilmiştir. Ancak burada sertliğe nazaran aşındırıcı yoğunluğunun etkisinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kayaç tipine göre, çakılma bölgesi derinlikleri ile aşındırıcıların sertlikleri arasında düşükten çok yükseğe değişen korelasyonda (Limra-2 haricinde, $r: 0,26-0,81$) ilişki gözlenmiştir. Bunun yanında, çakılma bölgesi derinlikleri ile aşındırıcıların yoğunlukları arasında ise orta-çok yüksek ($r: 0,41-0,90$) doğru orantılı ilişki tespit edilmiştir. Çakılma bölgesinin oluşma

mekanizmasında enerjisi tükenmek üzere olan jet içerisinde halen yüzeylere kuvvet uygulayıp aşındırmaya devam eden parçalanmış/küçülmüş aşındırıcı tanelerin yüzeylere darbe etkisinin önemli rolü vardır. Dolayısıyla, önceki bölümlerde belirtilen nedenlerden dolayı yoğun taneler daha yüksek darbe kuvveti uygulayacağından ve düşük yoğunluklu tanelerin olduğu jetin enerjisi daha hızlı tükeneceğinden, aşındırıcıların yoğunluklarıyla çakılma bölgesi derinliklerinin yüksek ilişkili olması doğaldır.

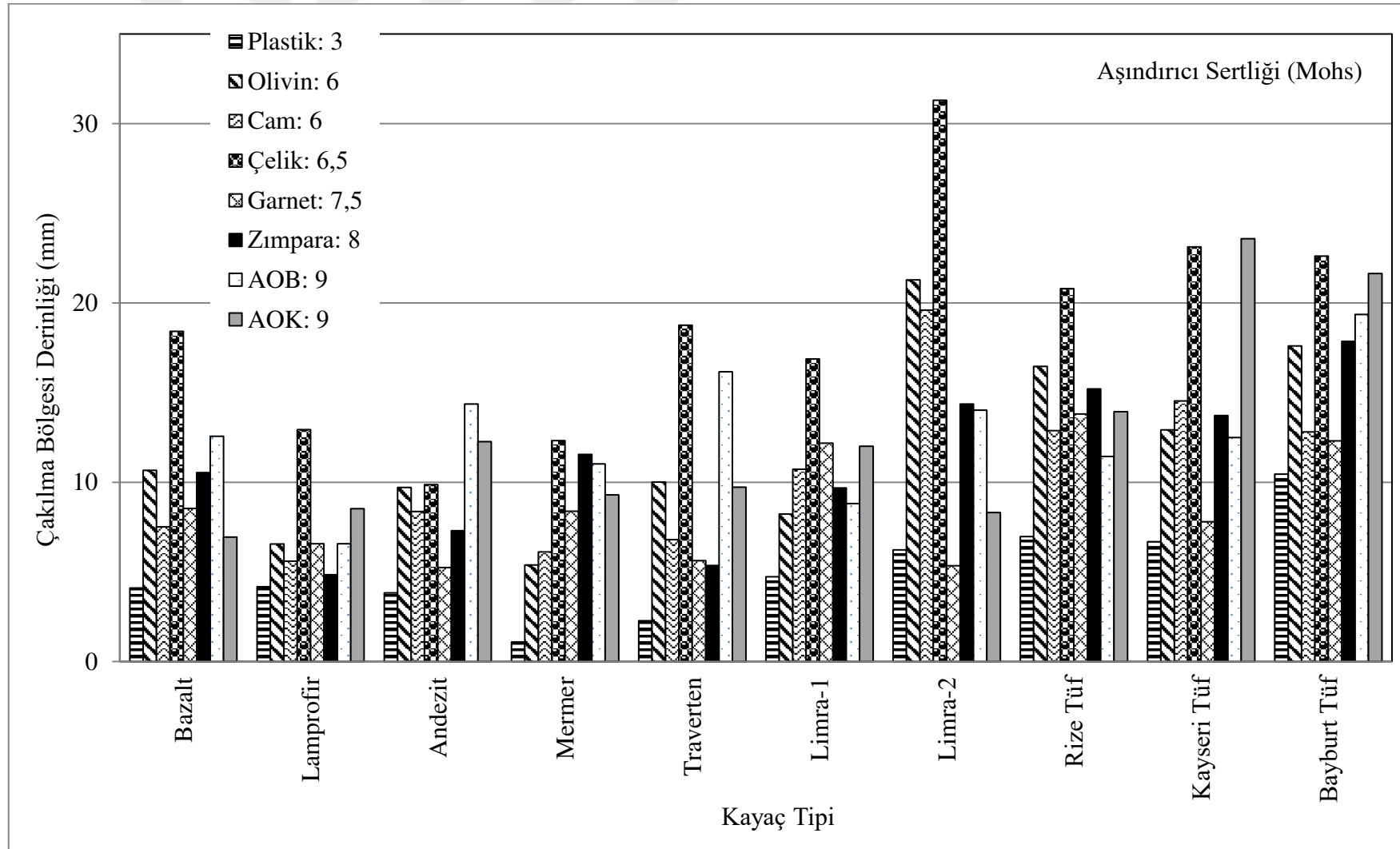
Tablo 3.33. Çakılma bölgesi derinliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı Özelligi	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	0,33	0,26	0,70	0,81	0,44	0,44	-0,04	0,35	0,45	0,63
Yoğunluk (g/cm ³)	0,90	0,89	0,41	0,84	0,78	0,89	0,62	0,87	0,67	0,77

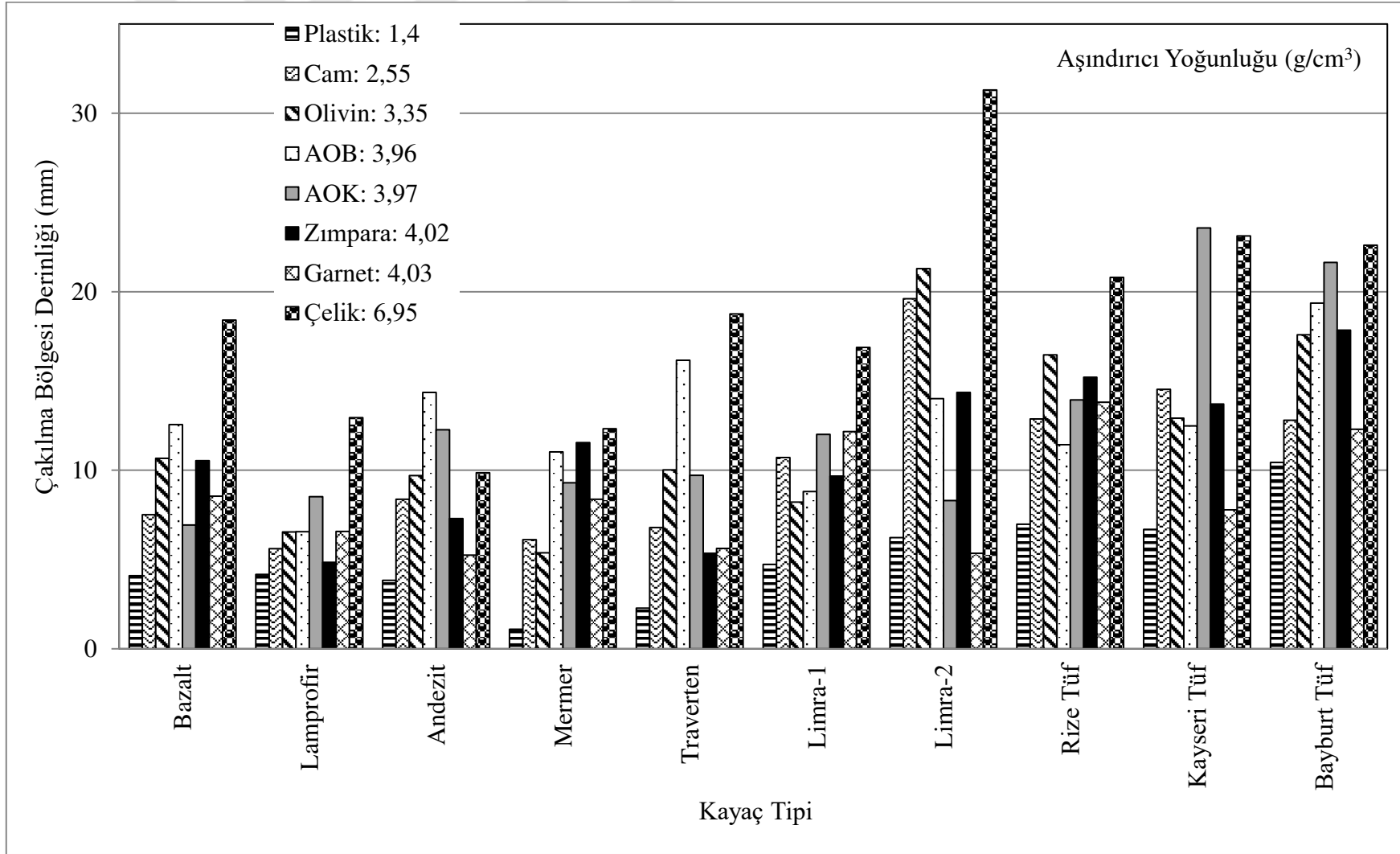
Çakılma bölgesi genişlikleri temelinde aşındırıcıların performansları ise Şekil 3.65'te gösterilmektedir. Farklı kayalardan elde edilen giriş ve çıkış çakılma bölgesi genişliklerinin ortalaması alınarak elde edilen değerler aşındırıcı tipine göre gruplandırılmıştır. Her kayacın kendi içerisinde değerlendirildiğinde; en yüksek çakılma bölgesi genişlik değerleri, kesme genişliklerinde olduğu gibi çelik ve cam ile elde edilmiştir. Diğer aşındırıcılarla elde edilen çakılma bölgesi genişlikleri ise daha düşük ve birbirine yakındır. Küresel şekilli olan aşındırıcılar, kesme genişliğinde olduğu gibi özellikle giriş yan duvarına ilk temasta oluşturdukları genişliklerle bu durumu meydana getirmiş olabilirler. Şekil 3.66 ve Şekil 3.67'de aşındırıcıların sırasıyla sertliğine ve yoğunluğuna göre çakılma bölgesi genişlikleri verilmektedir. Tablo 3.34'te ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle çakılma bölgesi genişlikleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir.



Şekil 3.62. Aşındırıcı tipine göre çakılma bölgesi derinlikleri



Şekil 3.63. Aşındırıcı sertliğine göre çakılma bölgesi derinlikleri

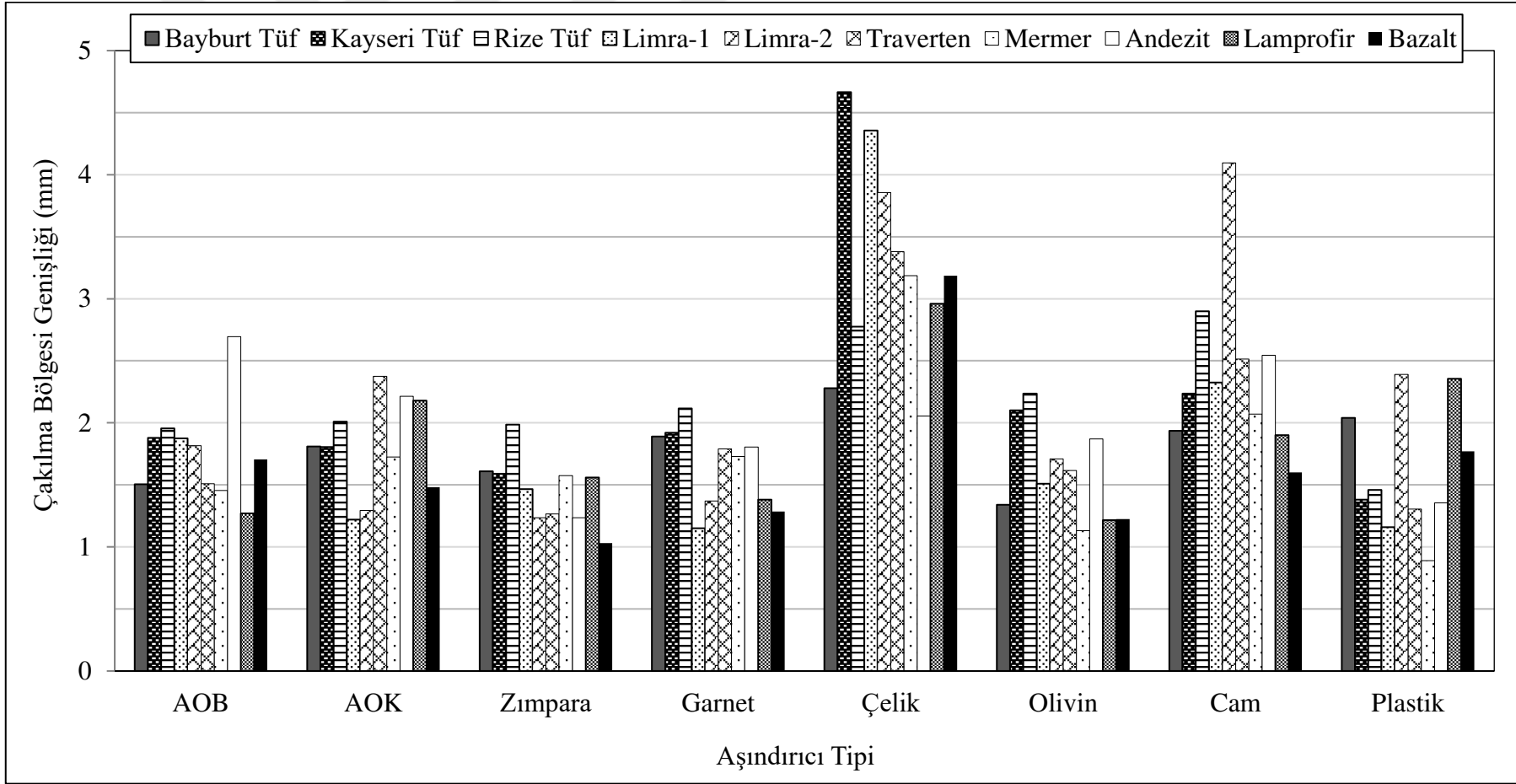


Şekil 3.64. Aşındırıcı yoğunluğuna göre çakılma bölgesi derinlikleri

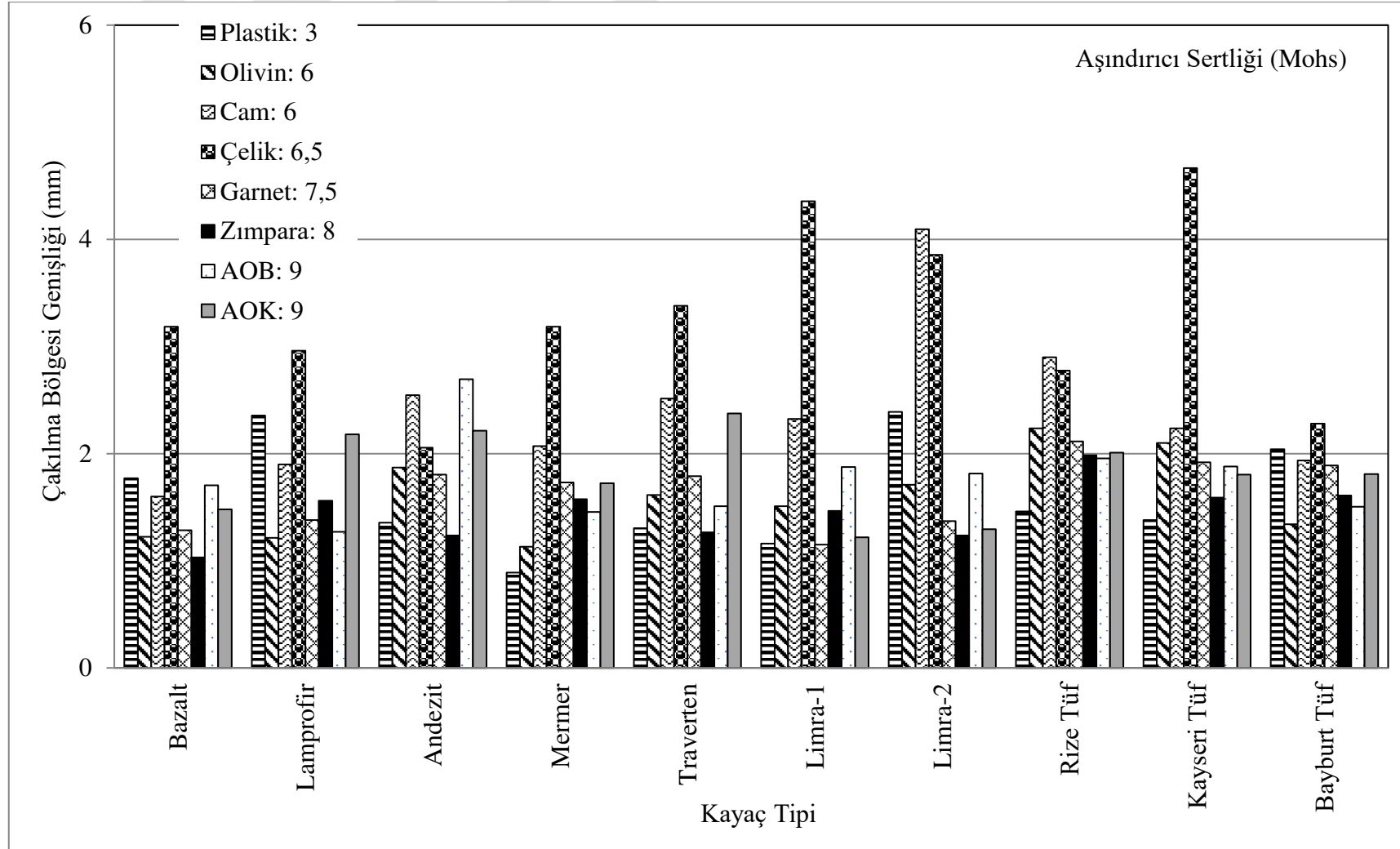
Tablo 3.34. Çakılma bölgesi genişliği ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcı Özelliği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,19	-0,35	0,43	0,22	0,08	-0,04	-0,44	0,12	0,00	-0,38
Yoğunluk (g/cm ³)	0,62	0,34	0,18	0,82	0,65	0,73	0,16	0,49	0,82	0,27

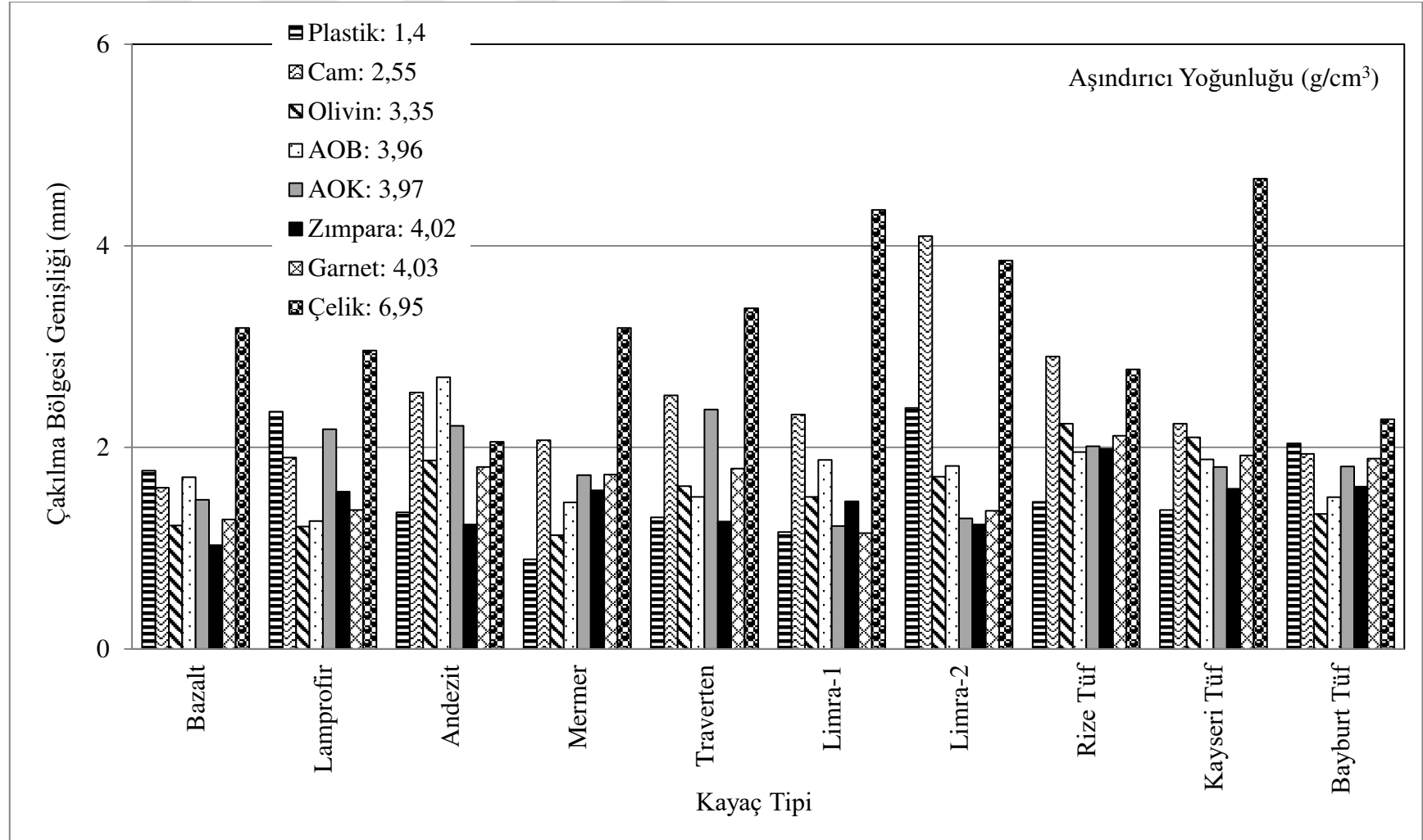
Aşındırıcıların sertlikleriyle çakılma bölgesi genişlikleri arasında anlamlı bir ilişki görülmemektedir. Bu durum kesme genişliğiyle benzer bir bulgudur. Ancak, aşındırıcıların yoğunluğuyla çakılma bölgesi genişliği arasında, her ne kadar kayaç tipine göre korelasyon katsayıları çok düşükten çok yükseğe değişse de (r : 0,16-0,82), doğru orantılı bir eğilim görülmektedir. Bu bulgu kesme genişliklerinde olmamasına rağmen çakılma bölgesi genişliğinde tespit edilmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi bunun nedeninin de jetin kinetik enerjisi ve aşındırıcı darbe etkisine bağlı olduğu düşünülmektedir. Yüksek yoğunluklu aşındırıcının yer aldığı jet, daha fazla darbe etkisine sahip olacak ve kesimin dibindeki türbülanslar, darbe etkileri fazla olacaktır. Böylelikle çakılma bölgesinde kesim iç duvarlarının aşınması daha yüksek olacak ve çakılma bölgesi genişleyecektir.



Şekil 3.65. Aşındırıcı tipine göre çakılma bölgesi genişlikleri



Şekil 3.66. Aşındırıcı sertliğine göre çakılma bölgesi genişlikleri



Şekil 3.67. Aşındırıcı yoğunluğuna göre çakılma bölgesi genişlikleri

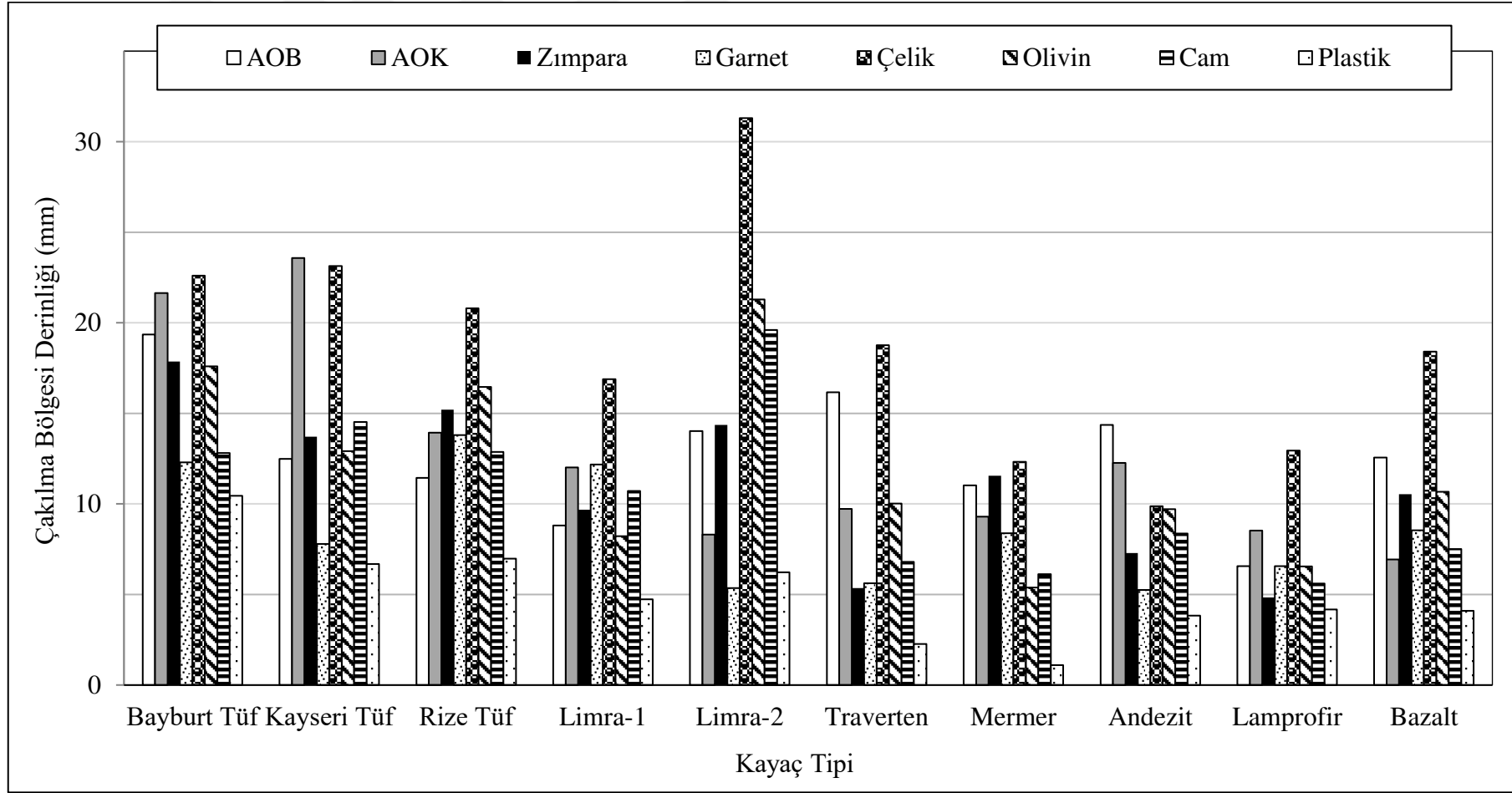
3.4.2.2. Kayaç Özelliklerinin Çakılma Bölgesine Etkileri

Kayaç tipine göre çakılma bölgesi derinlikleri Şekil 3.68’de gösterilmektedir. Elde edilen çakılma bölgesi derinliklerine göre kayaçları iki gruba ayırmak mümkündür. Tüflerde ve limralarda daha yüksek (aşındırıcı tipine göre h_c : 1,74-46,68 mm), diğerlerinde ise daha düşük çakılma bölgesi derinlikleri elde edilmiştir (aşındırıcı tipine göre h_c : 0,79-27,95 mm). Kayaç tipine göre gerçekleştirin gruplama, kesme derinliği gruplamalarıyla benzer özelliktedir. Tablo 3.35’te kayaçların fiziksel ve mekanik özellik değerleriyle çakılma bölgesi derinlikleri arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

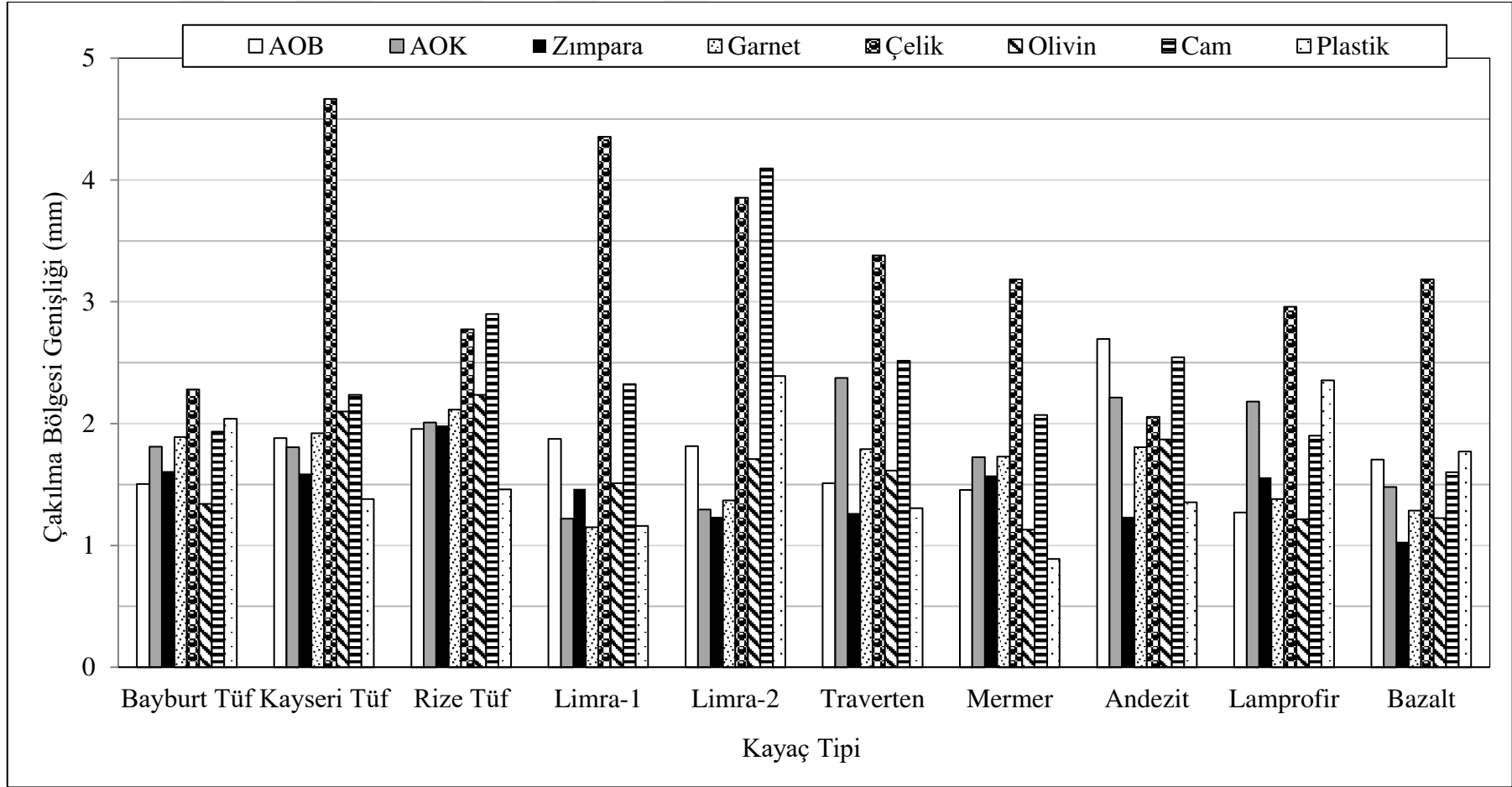
Tablo 3.35. Çakılma bölgesi derinliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,30	0,44	0,52	-0,58	-0,26	-0,18	-0,38	-0,43	-0,37	-0,40
AOK	0,60	0,81	0,84	-0,89	-0,34	-0,44	-0,60	-0,61	-0,78	-0,85
Zımpara	0,77	0,75	0,75	-0,69	-0,74	-0,75	-0,61	-0,69	-0,52	-0,58
Garnet	0,58	0,49	0,51	-0,45	-0,71	-0,78	-0,43	-0,44	-0,36	-0,34
Çelik	0,67	0,51	0,47	-0,46	-0,56	-0,51	-0,42	-0,42	-0,25	-0,36
Olivin	0,71	0,70	0,66	-0,65	-0,69	-0,64	-0,50	-0,53	-0,34	-0,54
Cam	0,81	0,65	0,57	-0,60	-0,68	-0,66	-0,64	-0,66	-0,54	-0,55
Plastik	0,71	0,98	0,96	-0,90	-0,64	-0,71	-0,53	-0,53	-0,49	-0,82

Çakılma bölgesi derinliğinin kayaçların Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranlarıyla doğru orantılı; yoğunluk, sertlik, dayanım ve ultrasonik dalga hızı değerleri ile ise ters orantılı bir eğilimde olduğu görülmektedir. Yine burada da kesme derinliğiyle aynı eğilimler elde edilmiştir. Yalnızca, elde edilen korelasyon katsayıları daha düşüktür. Bu nedenle (Şekil 3.5-3.11 ile aynı grafiksel motifi vereceğinden) kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri temelinde çakılma bölgesi derinlikleri grafik olarak verilmemiştir.



Şekil 3.68. Kayaç tipine göre çakılma bölgesi derinlikleri



Şekil 3.69. Kayaç tipine göre çakılma bölgesi genişlikleri

Kayaç özelliklerinin kesme derinliği üzerindeki etki mekanizmaları, fiziksel ve mekanik olgular, çakılma bölgesi üzerinde de aynı şekilde açıklanabilir. Kesme derinliği arttıkça çakılma bölgesi derinliği de artmaktadır.

Kayaç tipine göre çakılma bölgesi genişlikleri Şekil 3.69’da gösterilmektedir. Elde edilen çakılma bölgesi genişliklerine göre kayaç tipi temelinde anlamlı bir farklılık olduğu söylenemez. Çakılma bölgesi genişliklerinin Kayseri Tuf ve Limra türü kayaçlarda genel olarak diğerlerinden çok az miktarlarda daha yüksek olduğu söylenebilir. Tablo 3.36’da ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellik değerleriyle çakılma bölgesi genişlikleri arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

Tablo 3.36. Çakılma bölgesi genişliği ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı cm ³ /50 cm ²	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,17	0,17	0,09	-0,23	-0,16	-0,12	-0,21	-0,32	-0,47	-0,44
AOK	-0,36	-0,10	-0,06	0,01	0,36	0,35	0,19	0,28	0,15	0,02
Zımpara	0,53	0,43	0,43	-0,40	-0,54	-0,63	-0,50	-0,43	-0,37	-0,26
Garnet	0,34	0,42	0,46	-0,52	-0,28	-0,27	-0,41	-0,40	-0,44	-0,44
Çelik	0,28	-0,09	-0,16	0,08	-0,03	-0,05	-0,15	-0,13	-0,21	0,01
Olivin	0,59	0,44	0,34	-0,48	-0,46	-0,44	-0,46	-0,47	-0,58	-0,59
Cam	0,51	0,10	0,02	-0,10	-0,50	-0,40	-0,47	-0,45	-0,24	-0,01
Plastik	0,00	0,35	0,31	-0,17	-0,02	-0,05	0,18	0,24	0,37	-0,14

Çakılma bölgesi genişliği ile kayaç özellikleri arasında anlamlı bir ilişkinin varlığından söz edilemeyeceği görülmektedir. Kesme genişliğinde olduğu gibi burada da malzeme özelliklerinin net bir etkisi bulunamamıştır. Tüm malzeme özellikleri içerisinde çakılma bölgesi genişliğine daha çok jetin kinetik enerjisinin, dolayısıyla aşındırıcı yoğunluğunun, ikinci olarak da aşındırıcı tane şeklinin (küresel olanlarla daha geniş çakılma bölgeleri) etki ettiği tespit edilmiştir.

3.5. Yüzey Karakterizasyonu

3.5.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Kesme iç yüzeylerinden ölçülen yüzey pürüzlülüğü (R_a , R_q ve R_z) değerleri ve ölçümlerin standart sapmaları sırasıyla Tablo 3.37 ve 3.42’de verilmektedir.

Tablo 3.37. Aritmetik ortalama sapma pürüzlülük değerleri, R_a (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	9,96	10,30	12,69	11,43	10,82	12,08	10,74
Lamprofir	6,10	8,30	7,98	8,68	8,08	8,85	8,88
Bazalt	6,82	6,08	5,82	8,96	6,33	6,40	7,56
Mermer	4,85	5,99	5,53	6,56	5,20	5,53	5,58
Traverten	6,74	6,37	8,08	8,03	5,92	4,33	5,62
Limra-1	7,44	10,16	8,01	11,36	10,71	12,06	12,37
Limra-2	7,58	9,48	10,34	10,69	10,44	9,64	9,75
Kayseri Tüf	7,79	9,46	8,83	8,05	5,50	7,96	8,83
Rize Tüf	8,68	8,95	9,38	9,88	9,09	9,10	11,76
Bayburt Tüf	10,08	9,33	9,79	9,99	9,33	9,18	9,34

Tablo 3.38. R_a değerleri standart sapmalar (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	1,20	1,19	2,52	0,72	3,31	3,69	0,92
Lamprofir	1,13	1,61	1,11	1,14	1,31	0,76	0,90
Bazalt	0,75	0,59	0,81	0,99	0,78	1,29	0,91
Mermer	0,50	0,71	1,12	0,59	0,47	0,81	1,29
Traverten	0,88	1,60	1,58	0,38	1,55	0,72	0,49
Limra-1	1,26	1,20	1,11	1,01	2,53	1,32	1,74
Limra-2	1,16	1,18	1,13	2,29	0,88	1,68	2,57
Kayseri Tüf	1,26	1,05	0,68	1,03	0,91	2,15	1,57
Rize Tüf	1,46	1,54	1,57	1,24	1,58	1,58	1,08
Bayburt Tüf	1,88	1,77	2,96	2,31	1,62	0,28	0,84

Tablo 3.39. Aritmetik ortalama sapmaların karekökü pürüzlülük değerleri, R_q (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	11,94	12,72	15,23	14,58	13,30	14,50	13,02
Lamprofir	7,68	10,25	9,97	10,67	9,82	10,68	10,80
Bazalt	8,35	7,53	7,13	11,02	7,76	7,89	9,28
Mermer	5,92	7,40	6,73	8,10	6,35	6,81	6,86
Traverten	8,23	8,04	9,83	10,00	7,16	5,43	6,97
Limra-1	8,95	12,53	9,79	13,97	12,91	14,86	15,52
Limra-2	9,49	11,81	12,62	13,40	12,89	11,61	11,91
Kayseri Tüf	9,64	11,56	10,87	10,17	6,75	10,16	10,76
Rize Tüf	10,55	11,18	11,75	11,97	11,10	11,03	14,10
Bayburt Tüf	12,69	11,80	12,08	12,23	11,48	11,24	11,28

Tablo 3.40. R_q değerleri standart sapmalar (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	1,38	1,43	2,69	1,23	4,22	3,87	1,39
Lamprofir	1,67	2,10	1,39	1,62	1,48	0,95	1,16
Bazalt	0,77	0,65	0,95	1,17	0,78	1,58	1,20
Mermer	0,56	0,89	1,34	0,77	0,47	1,14	1,63
Traverten	1,14	2,11	2,04	0,57	1,79	1,02	0,82
Limra-1	1,72	1,34	1,33	1,40	2,86	1,71	1,83
Limra-2	1,87	1,46	1,46	2,88	1,00	1,68	3,38
Kayseri Tüf	1,49	1,34	0,88	1,24	1,00	1,68	1,87
Rize Tüf	1,96	1,78	1,75	1,42	2,03	1,87	0,99
Bayburt Tüf	2,22	2,30	3,43	2,90	1,89	0,45	1,07

Tablo 3.41. Maksimum pürüzlülük derinliği değerleri, R_z (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	44,81	53,23	61,69	60,27	54,34	58,69	56,12
Lamprofir	33,35	43,96	42,77	43,97	37,36	42,07	43,76
Bazalt	34,74	31,89	30,50	45,80	31,14	32,72	36,55
Mermer	24,81	31,52	28,25	33,82	26,70	28,54	29,20
Traverten	33,43	34,07	37,77	39,40	27,71	21,84	31,20
Limra-1	40,90	52,05	40,38	58,88	51,39	61,67	63,50
Limra-2	38,99	51,19	51,65	57,58	51,46	45,21	48,20
Kayseri Tüf	41,27	48,28	46,71	42,33	27,54	39,99	42,80
Rize Tüf	42,28	49,45	51,65	49,41	46,19	45,49	53,07
Bayburt Tüf	55,31	51,89	51,48	50,37	48,25	44,79	46,39

Tablo 3.42. R_z değerleri standart sapmalar (μm)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam
Andezit	5,13	7,24	4,90	6,03	16,60	12,00	5,43
Lamprofir	6,63	9,55	5,32	3,78	5,37	6,96	4,63
Bazalt	3,66	3,06	3,12	3,55	3,46	6,17	4,13
Mermer	1,57	3,45	5,17	2,54	2,42	5,98	7,23
Traverten	5,28	9,45	8,36	3,25	5,05	4,20	3,57
Limra-1	7,89	6,36	2,87	7,29	8,63	7,11	4,69
Limra-2	7,51	5,93	6,24	10,32	4,37	5,56	13,23
Kayseri Tüf	5,02	5,19	5,21	4,67	2,94	5,62	6,53
Rize Tüf	8,80	7,47	7,55	5,25	8,30	8,13	4,25
Bayburt Tüf	8,81	10,16	10,74	12,23	6,24	1,57	4,79

Plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerde, pürüzlülük ölçer cihazını kullanabilecek kadar kesme-aşınma bölgesi derinliği oluşmadığı için bu yüzeylerden pürüzlülük ölçümleri alınamamıştır. Pürüzlülük parametreleri için en küçük değerler, aşındırıcı olarak zımparanın kullanıldığı traverten kesimlerinden elde edilmiştir (R_a: 4,33, R_q: 5,43 ve R_z: 21,84 μm). En yüksek pürüzlülük değerleri ise R_a için 12,69 μm ile aşındırıcı olarak AOK'un kullanıldığı andezit; diğer parametreler için ise aşındırıcı olarak camın kullanıldığı Limra-1 (R_q: 15,52 ve R_z: 63,50 μm) kesimlerinde elde edilmiştir. Standart sapmaların nispeten yüksek olduğu da söylenebilir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde her bir ölçüm, 1 cm uzunluğunda bir çizgiyi tarayarak o çizginin pürüzlülük değerlerini vermektedir. Kesme uzunluğu boyunca (20 cm) elde edilen pürüzlülük değerlerin ortalamasıyla da ilgili kesime ait yüzey pürüzlülüğü elde edilmektedir (Ek Tablo 3). Dolayısıyla uzun bir kesim hattı boyunca her noktada mikron mertebesinde farklı değerlerin elde edilmesi doğaldır.

3.5.1.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Yüzey pürüzlülüğü temelinde aşındırıcıların performansları Şekil 3.70'te görülmektedir. Her üç pürüzlülük parametresi de aynı eğilimi gösterdiği için şekillerde yüzey pürüzlülüğünü temsil etmek üzere sadece R_a değerleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü temelinde aşındırıcılarla elde edilen değerler birbirine yakındır. Bu sebepten net bir ayrımın yapılması uygun olmayacaktır. Yalnızca, garnet ile diğerlerinden biraz daha

düşük değerler elde edildiği söylenebilir (kayaç tipine göre, R_a : 4,85-10,08 μm). Diğer aşındırıcılarla da 4,33-12,69 μm arasında değişen R_a değerleri elde edilmiştir

Şekil 3.71 ve Şekil 3.72’de sırasıyla aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarına göre yüzey pürüzlülükleri verilmektedir. Tablo 3.43-3.45’te ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluk değerleriyle yüzey pürüzlülükleri arasındaki korelasyon katsayıları, her pürüzlülük parametresi için sunulmaktadır.

Tablo 3.43. R_a ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

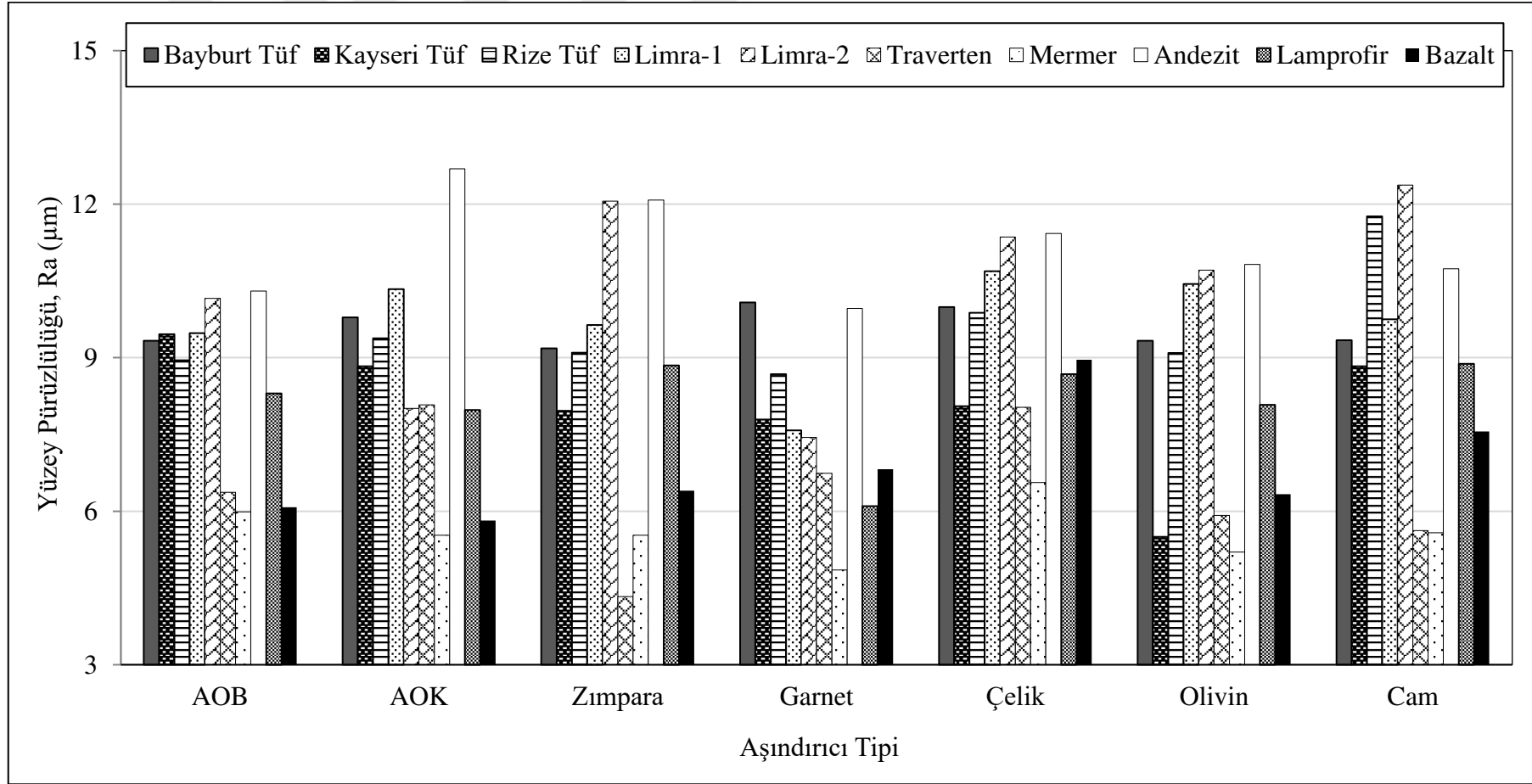
Aşındırıcı Özellği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,63	-0,16	0,30	0,03	0,16	-0,19	-0,50	-0,53	0,59	0,02
Yoğunluk (g/cm^3)	0,63	0,07	0,20	0,69	0,56	0,27	-0,01	-0,23	0,04	0,58

Tablo 3.44. R_q ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

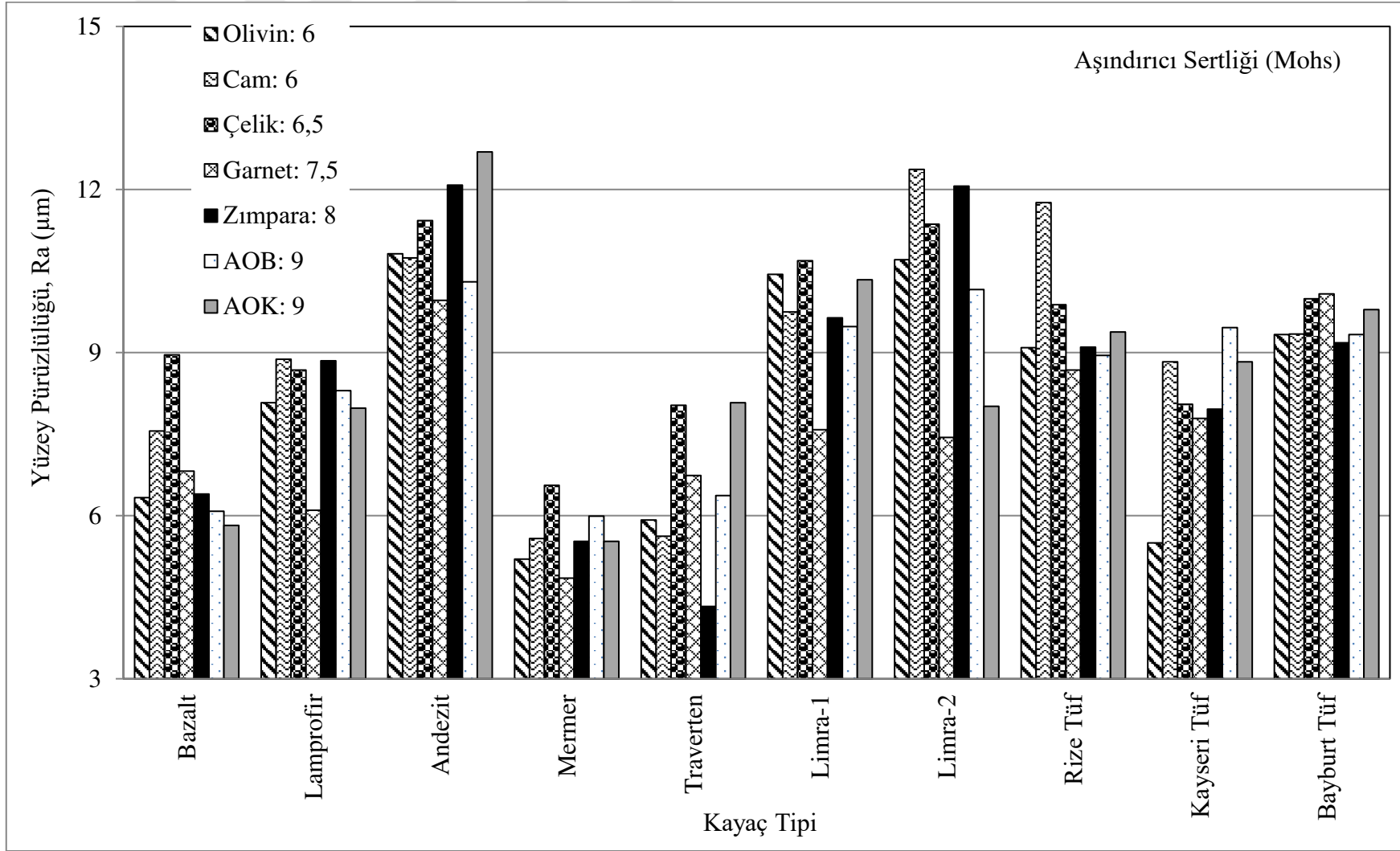
Aşındırıcı Özellği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,62	-0,11	0,21	0,02	0,18	-0,22	-0,48	-0,44	0,60	0,23
Yoğunluk (g/cm^3)	0,88	0,29	0,36	0,79	0,58	0,19	0,21	0,62	0,49	0,46

Tablo 3.45. R_z ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

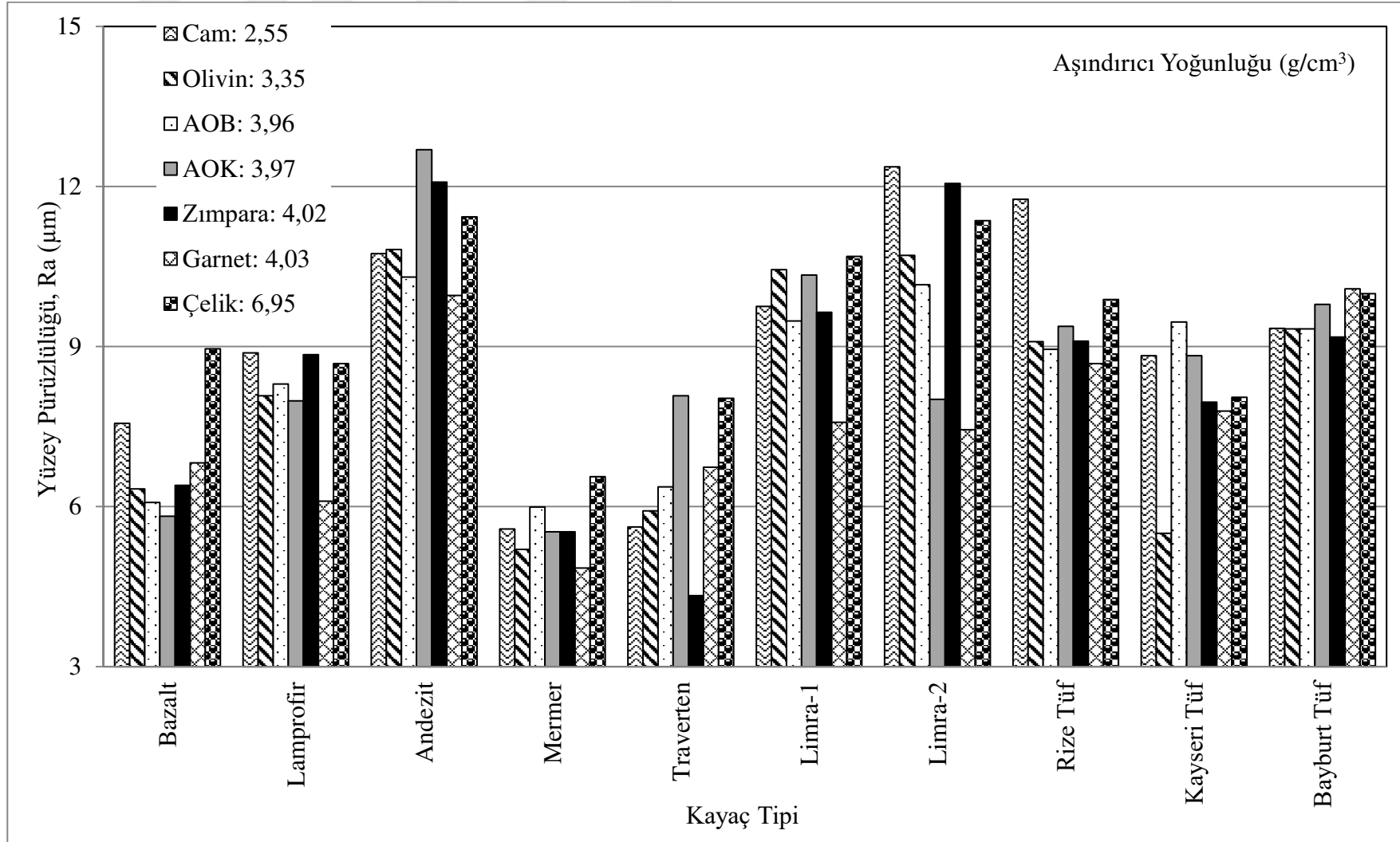
Aşındırıcı Özellği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	-0,48	0,07	0,08	0,03	0,15	-0,12	-0,48	0,01	0,67	0,36
Yoğunluk (g/cm^3)	0,75	0,20	0,29	0,63	0,51	0,50	0,05	-0,08	0,17	0,26



Şekil 3.70. Aşındırıcı tipine göre yüzey pürüzlülükleri



Şekil 3.71. Aşındırıcı sertliğine göre yüzey pürüzlülükleri



Şekil 3.72. Aşındırıcı yoğunluğuna göre yüzey pürüzlülükleri

Aşındırıcı sertliğiyle yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı bir ilişki elde edilmemiştir. Aşındırıcı yoğunlukları ile yüzey pürüzlülüğü artma eğilimi gösterse de bu eğilim de genel olarak tüm kayaç tiplerine yansımamış ve eğilimi bozan örnekler görülmüştür. Dolayısıyla aşındırıcı özelliklerinin yüzey pürüzlülüklerinde belirgin ve genelleştirilebilir bir etkisi tespit edilmemiştir.

3.5.1.2. Kayaç Özelliklerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Kayaç tipine göre yüzey pürüzlülükleri Şekil 3.73'te gösterilmektedir. Kayaç tipi ve özellikleriyle tüm pürüzlülük parametrelerinin değişimi aynı eğilimi gösterdiği için bu bölümdeki şekillerde de pürüzlülük parametresi olarak sadece R_a kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüklerine göre kayaçlar farklılık göstermektedir. Aşındırıcı tipine göre, en kaliteli yüzeyler mermerde (R_a : 4,85-6,56 μm) elde edilmiştir. Ardından traverten (R_a : 6,37-8,03 μm), bazalt (R_a : 5,82-8,96 μm) ve lamprofir (R_a : 6,10-8,88 μm) gelmektedir. Yüzey kalitesi daha düşük yüzeyler ise sırasıyla andezit (R_a : 9,96-12,69 μm) ve limralardan (R_a : 7,44-12,37 μm) elde edilmiştir. Tüfler ise ortada yer almaktadır (R_a : 5,50-11,76 μm). Kayaç tipine göre yüzey pürüzlülüklerinin gruplanabileceği görülmektedir.

Şekil 3.74-3.80'de kayaç özellikleriyle yüzey pürüzlülüklerinin değişim grafikleri verilmiştir. Tablo 3.46-3.48'de ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellik değerleriyle yüzey pürüzlülükleri arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.

Tablo 3.46. R_a ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

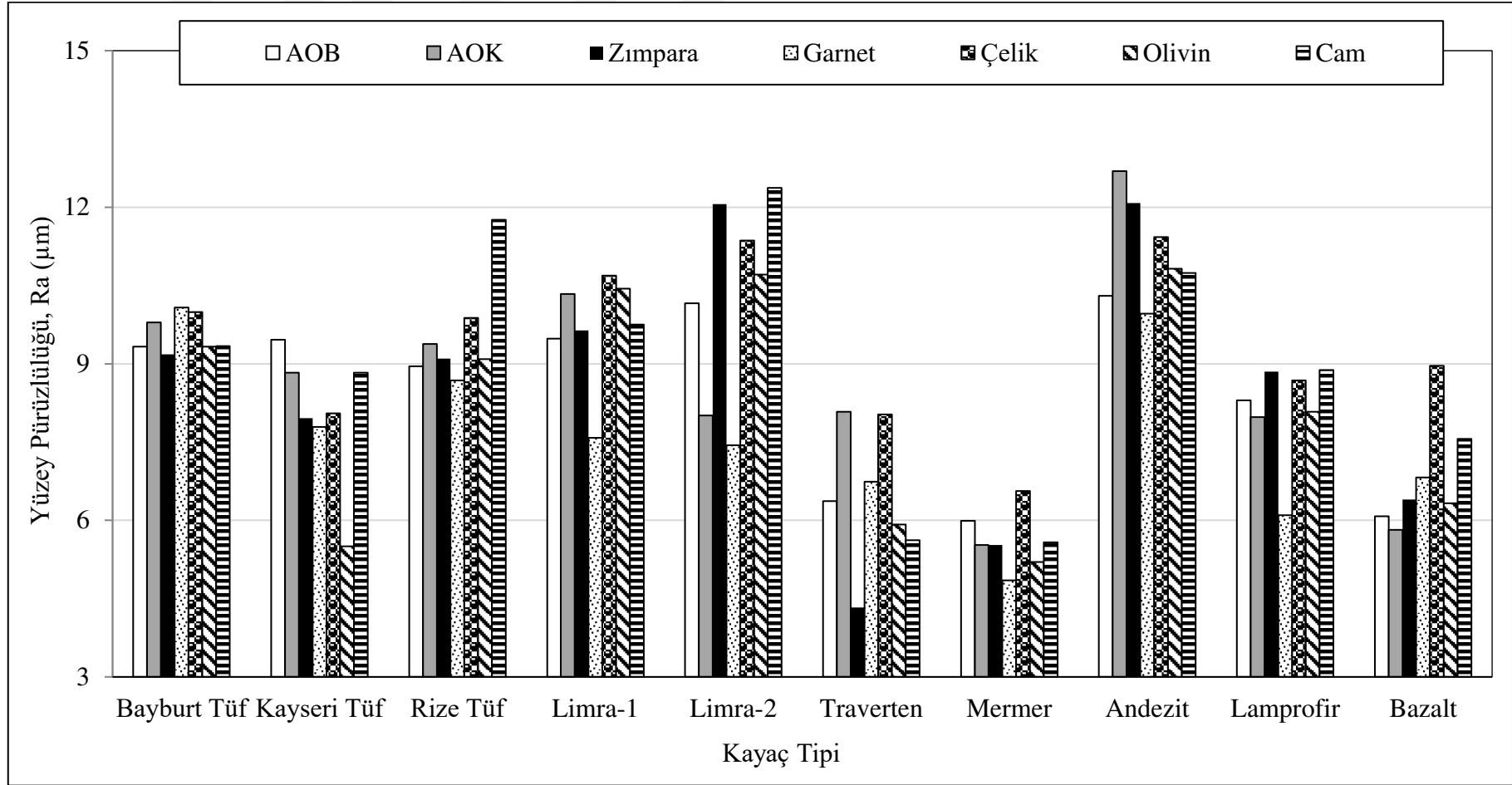
Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,60	0,65	0,57	-0,63	-0,46	-0,53	-0,59	-0,58	-0,63	-0,65
AOK	0,37	0,46	0,42	-0,55	-0,30	-0,34	-0,48	-0,47	-0,63	-0,57
Zımpara	0,38	0,46	0,37	-0,38	-0,37	-0,41	-0,36	-0,38	-0,36	-0,44
Garnet	0,50	0,77	0,75	-0,82	-0,48	-0,51	-0,48	-0,53	-0,61	-0,81
Çelik	0,39	0,41	0,33	-0,37	-0,47	-0,45	-0,32	-0,35	-0,31	-0,40
Olivin	0,40	0,37	0,31	-0,32	-0,51	-0,51	-0,40	-0,40	-0,30	-0,27
Cam	0,58	0,57	0,46	-0,46	-0,60	-0,62	-0,40	-0,42	-0,35	-0,52

Tablo 3.47. R_q ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

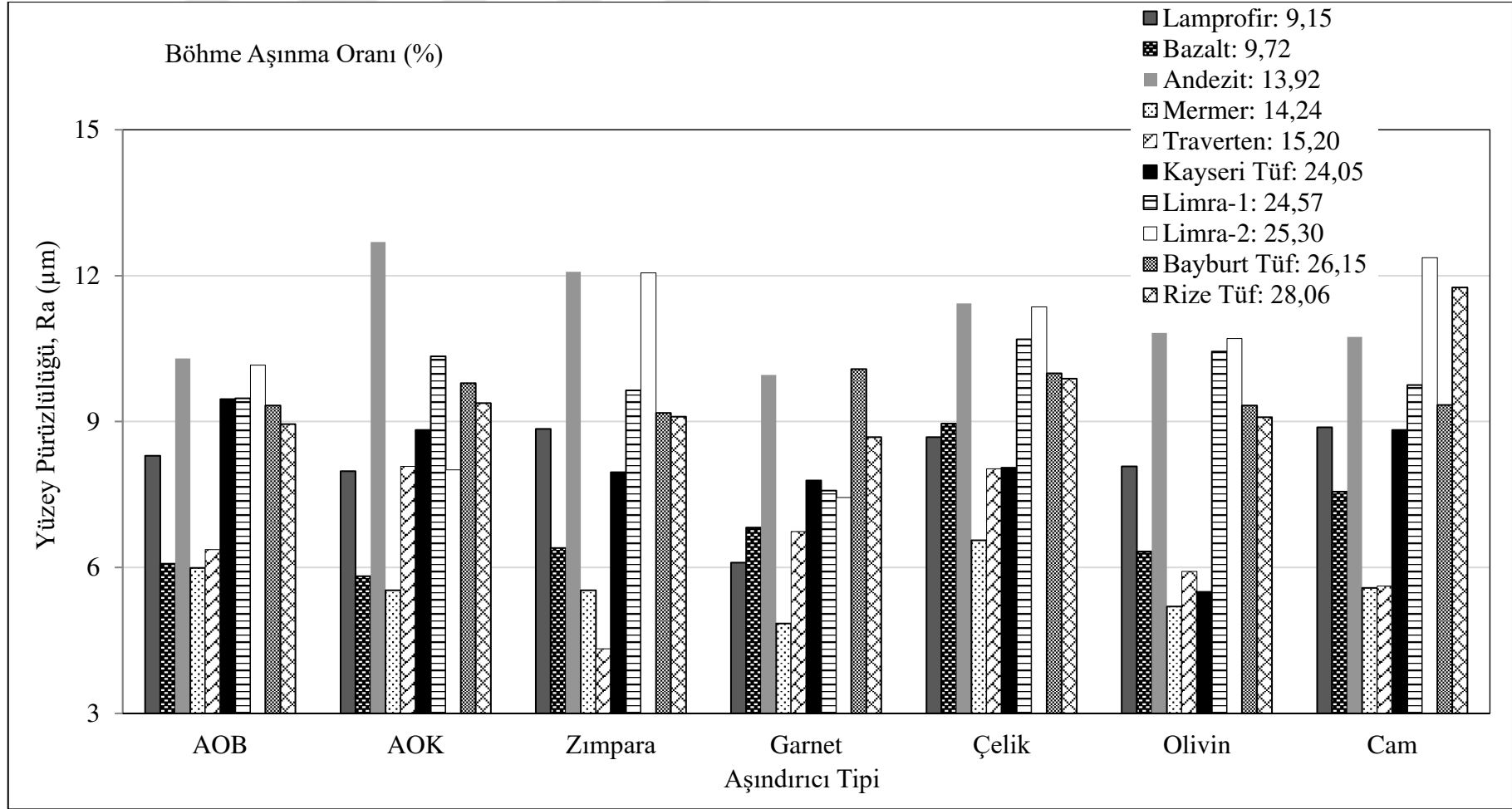
Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,62	0,67	0,60	-0,66	-0,49	-0,55	-0,61	-0,60	-0,64	-0,66
AOK	0,39	0,49	0,45	-0,57	-0,33	-0,38	-0,49	-0,48	-0,63	-0,59
Zımpara	0,41	0,48	0,39	-0,40	-0,49	-0,52	-0,38	-0,40	-0,38	-0,46
Garnet	0,51	0,80	0,79	-0,84	-0,49	-0,52	-0,49	-0,53	-0,62	-0,83
Çelik	0,36	0,39	0,31	-0,36	-0,41	-0,40	-0,32	-0,35	-0,34	-0,41
Olivin	0,40	0,37	0,31	-0,33	-0,51	-0,52	-0,41	-0,41	-0,32	-0,28
Cam	0,57	0,55	0,44	-0,44	-0,59	-0,60	-0,40	-0,41	-0,33	-0,49

Tablo 3.48. R_z ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

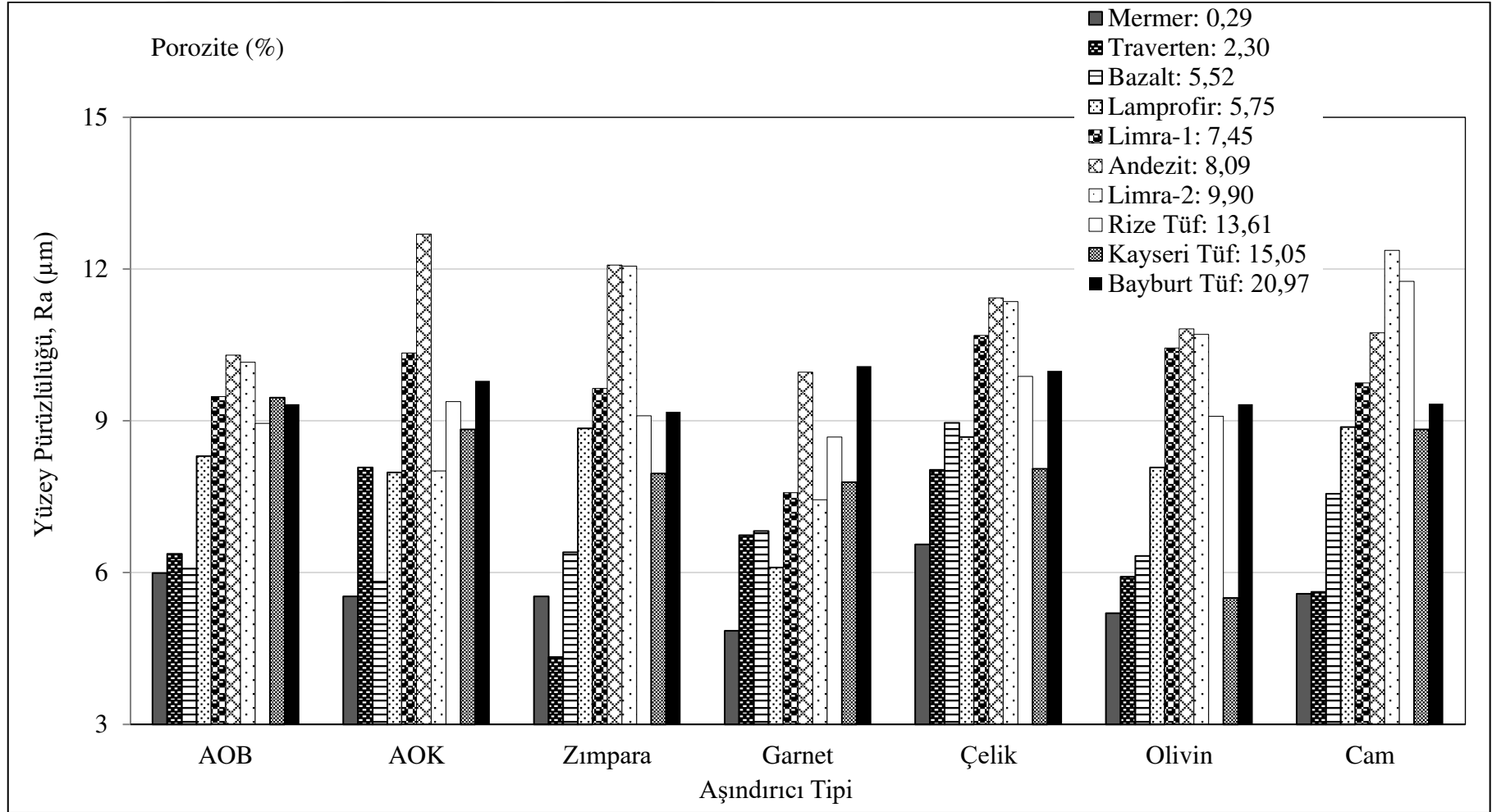
Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	0,66	0,71	0,64	-0,69	-0,56	-0,62	-0,64	-0,62	-0,65	-0,67
AOK	0,44	0,58	0,54	-0,63	-0,38	-0,45	-0,50	-0,49	-0,64	-0,66
Zımpara	0,47	0,48	0,40	-0,42	-0,46	-0,46	-0,43	-0,48	-0,43	-0,47
Garnet	0,61	0,91	0,90	-0,91	-0,55	-0,59	-0,54	-0,57	-0,60	-0,85
Çelik	0,38	0,38	0,29	-0,35	-0,43	-0,42	-0,33	-0,37	-0,36	-0,40
Olivin	0,45	0,43	0,38	-0,39	-0,56	-0,57	-0,46	-0,47	-0,38	-0,34
Cam	0,52	0,50	0,40	-0,42	-0,52	-0,53	-0,41	-0,42	-0,35	-0,46



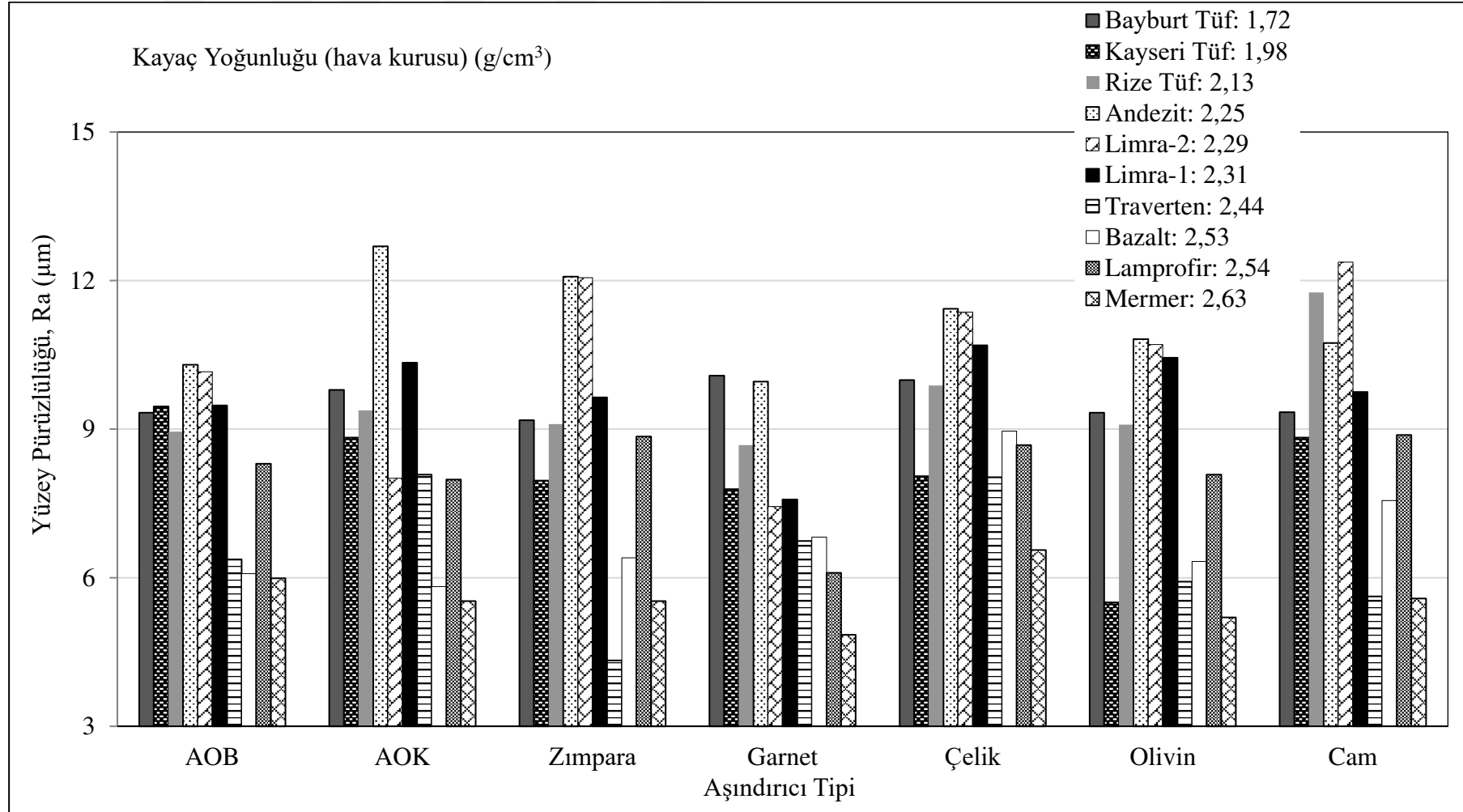
Şekil 3.73. Kayaç tipine göre yüzey pürüzlülükleri



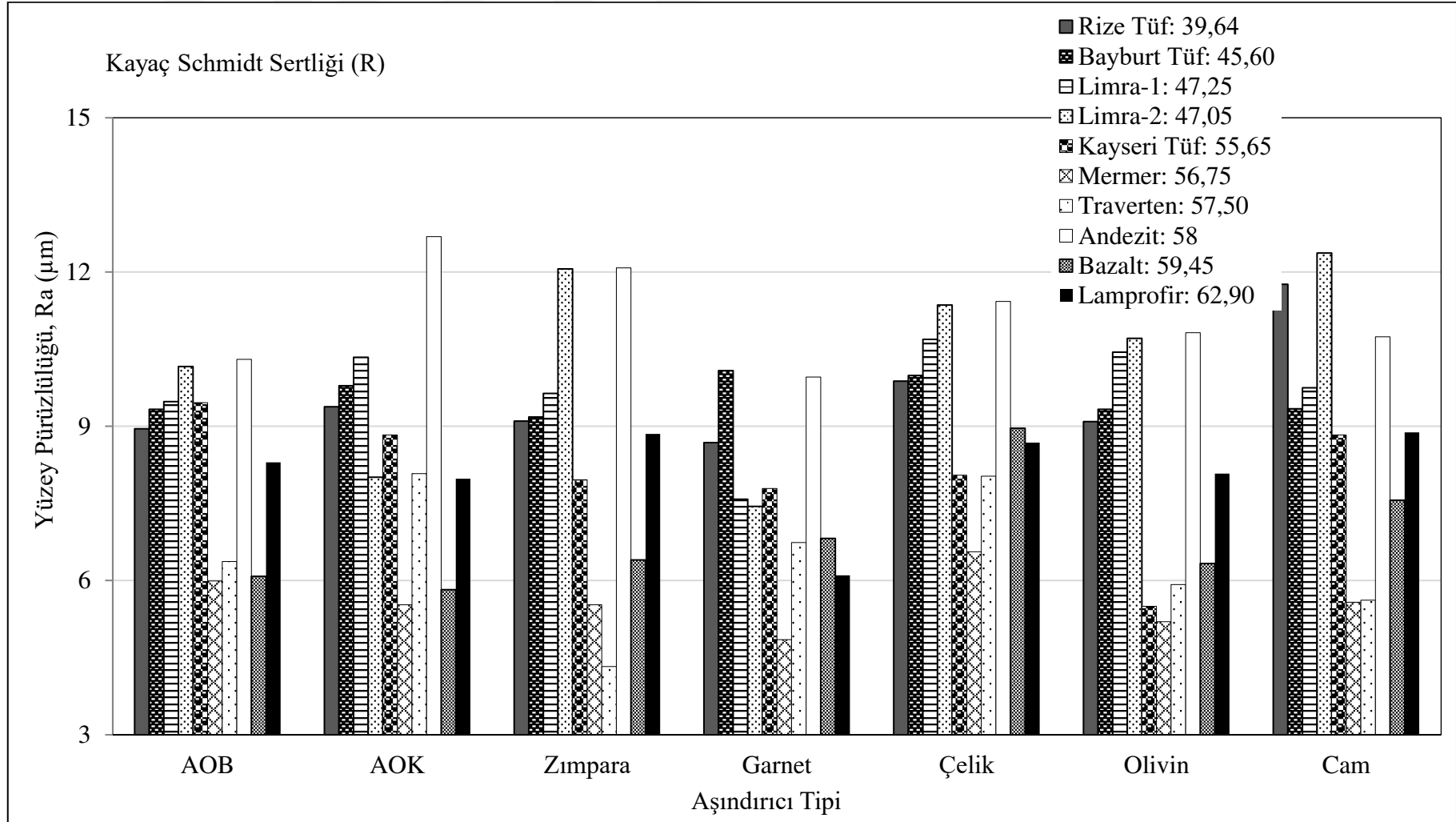
Şekil 3.74. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre yüzey pürüzlülükleri



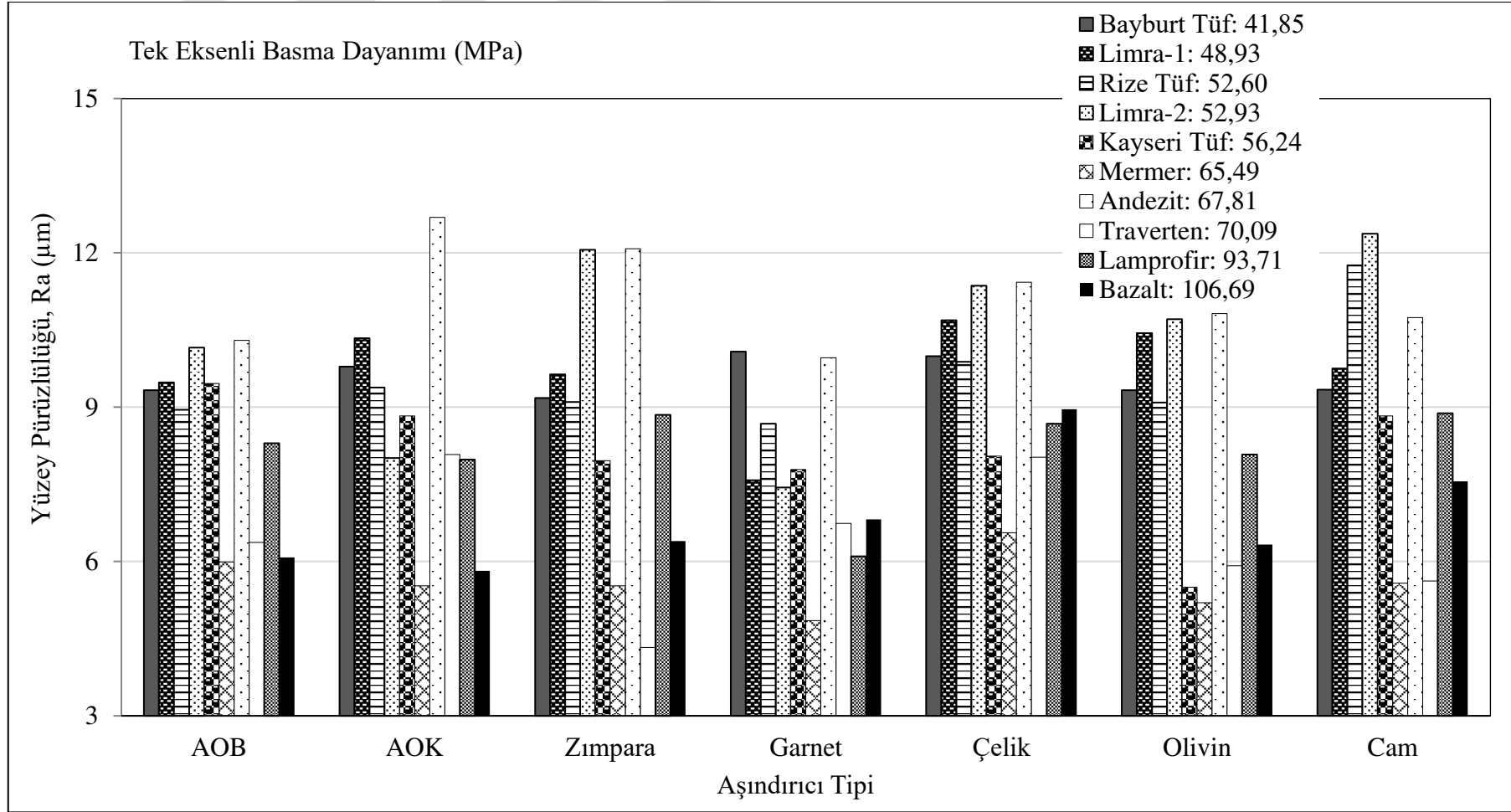
Şekil 3.75. Kayaçların porozitelerine göre yüzey pürüzlülükleri



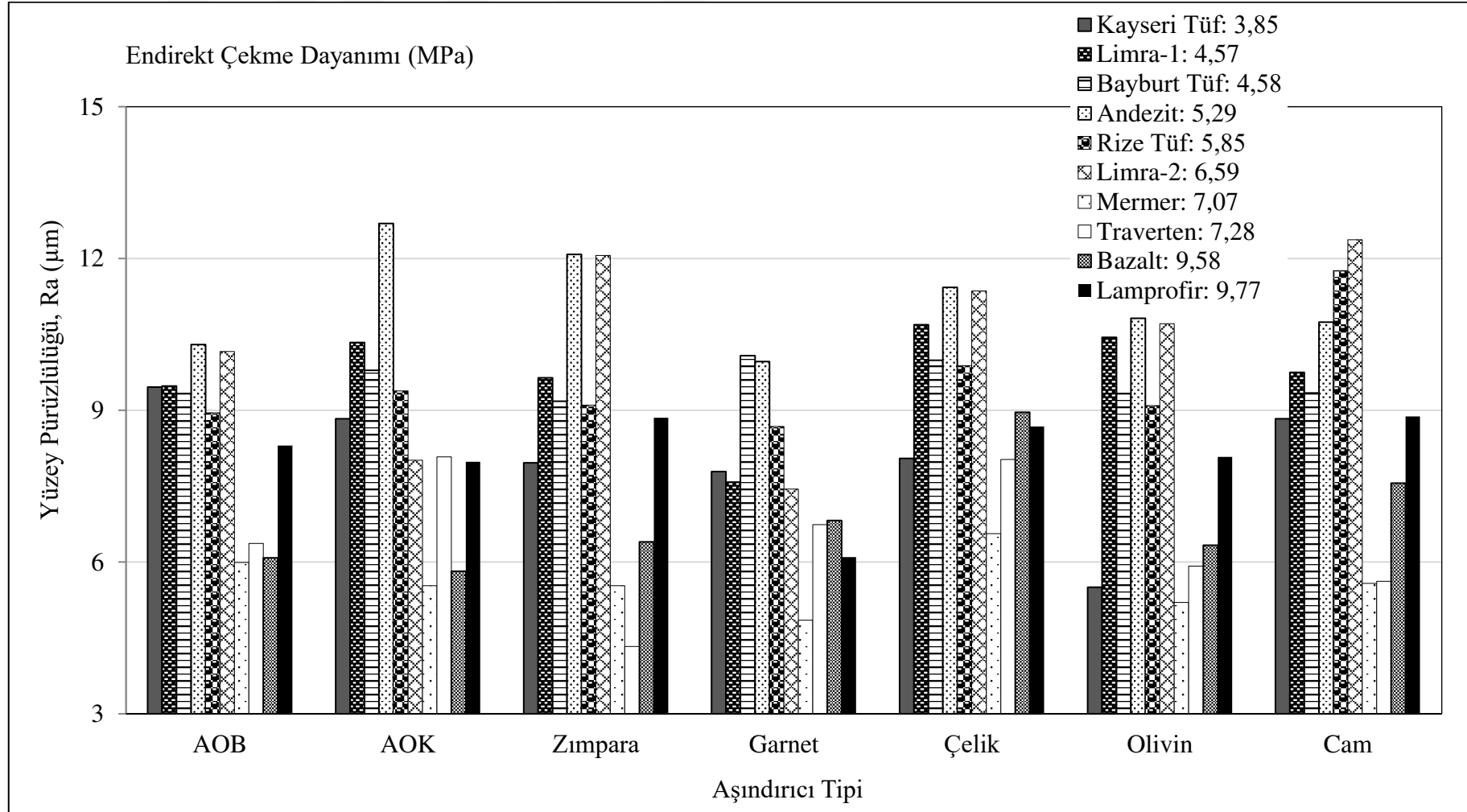
Şekil 3.76. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre yüzey pürüzlülükleri



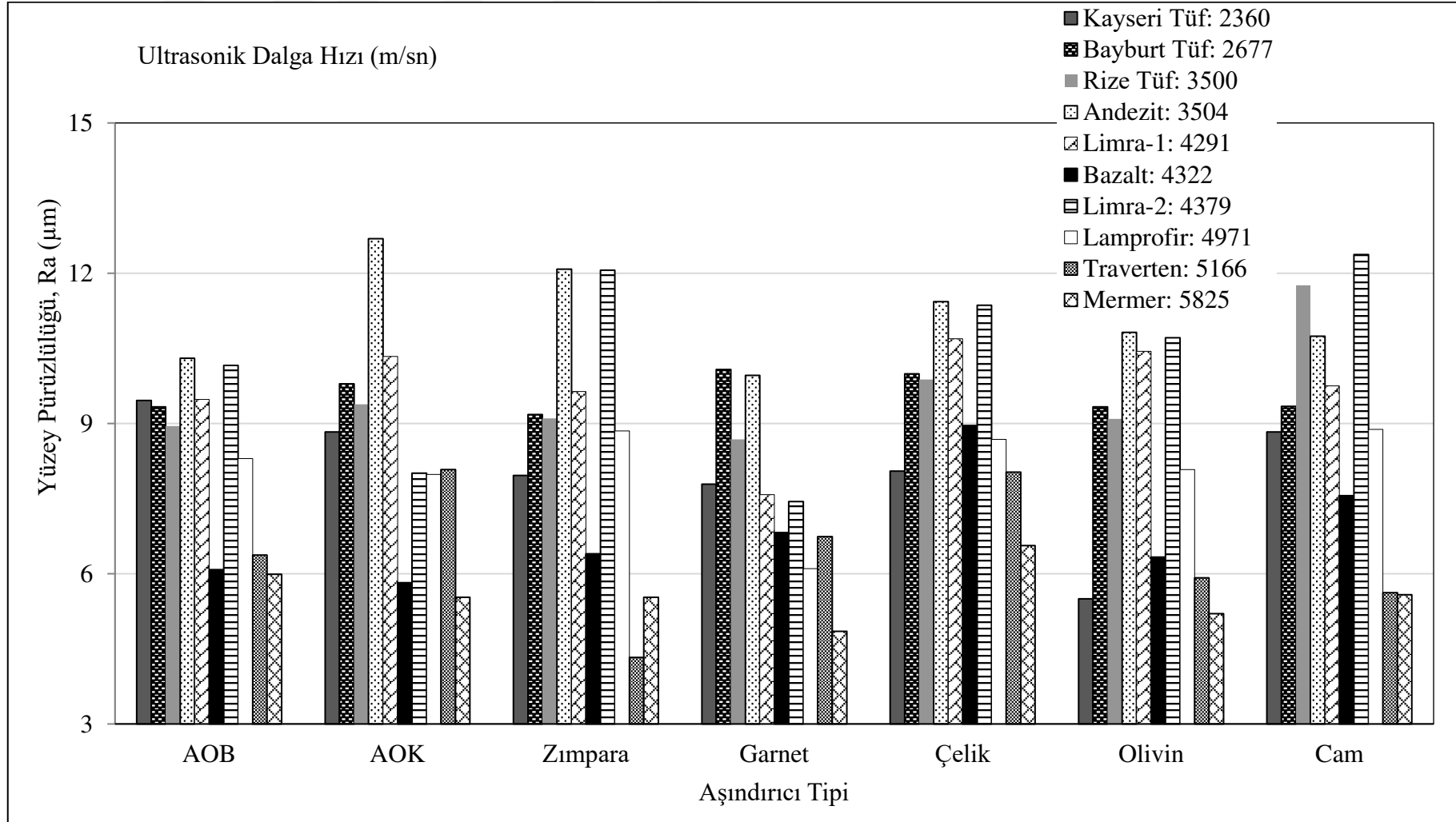
Şekil 3.77. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre yüzey pürüzlülükleri



Şekil 3.78. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre yüzey pürüzlülükleri



Şekil 3.79. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre yüzey pürüzlülükleri



Şekil 3.80. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre yüzey pürüzlülükleri

Her üç pürüzlülük parametresinin benzer eğilimlerde kayaç özellikleriyle ilişkili olduğu görülmektedir. Aşındırıcı tipine göre ilişkinin şiddeti çok düşükten çok yükseğe değişiklik gösterse de Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranı arttıkça yüzey pürüzlülüklerinin arttığı; diğer özelliklerin artmasıyla ise azaldığı tespit edilmiştir. Bu olgu, kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranındaki eğilimle aynı olup, kerf açısındaki eğilimle ise zıt yönlüdür. Diğer bir deyişle, kesme derinliği ve malzeme uzaklaştırma oranı arttıkça, yüzey pürüzlülüğünün de arttığı ve kerf açısının azaldığı tespit edilmiştir. Böhme aşınma kaybı yüksek olan kayaç, aşınmaya karşı daha dayanıksız olduğundan jet tarafından daha çok aşındırılmakta ve yüzeyindeki pürüzlülük artmaktadır. Porozitesi ve su emme oranı yüksek olan kayaçlarda da jet, katı kısma nazaran boşluklarda daha kolay ilerleyeceğinden aşındırıcıların kırılıp parçalanması daha yavaş olmaktadır. Bu ise jetin hızını, yani kinetik enerjisini daha uzun sürede tüketmesine olanak sağlamaktadır. Bunun sonucunda, jet kesme yüzeyine daha fazla temas etmekte ve yüzeyde ekstra aşınmalar meydana getirebilmektedir. Yoğunluğu yüksek kayaçta ise bunun tersi bir durum olasıdır. Çünkü jet, yüksek yoğunluklu malzemeyi uzaklaştırmakta zorlanmakta ve birim zamanda daha az malzeme aşındırmaktadır. Bu da jetin kinetik enerjisinin daha çabuk tükenmesi anlamına gelir. Böylece jetin yüzeylere etki süresi azalır ve daha düşük kesme kuvvetleriyle malzeme aşındırılmaya çalışılır. Bunun sonucunda da özellikle pürüzlülük ölçümlerinin alındığı kesme-aşınma bölgesinde daha az pürüzlü yüzeyler elde edilebilir. Sertlik ve dayanım için de benzer açıklamalar yapılabilir. Jet, sert kayaçları daha zor aşındırmaktadır. Sertliği düşük kayaçlarda ise aşındırıcı sertliği/numune sertliği oranı daha yüksek olacağından, jetin kayacı aşındırma ve dolayısıyla kesmesi daha kolay olacaktır. Böylece kesim yüzeyleri de daha fazla aşınarak daha pürüzlü şekilde oluşacaktır. Dayanımı yüksek kayaçlarda ise jetin karşılaştığı direnç daha fazla olacağından enerjisini daha çabuk tüketecektir. Ayrıca aşındırıcı taneler sert ve dayanımı yüksek kayaçlarda daha çabuk ve daha fazla oranda parçalanıp küçülebilirler. Bu olgular da jetin yüzeylere etki süre ve kuvvetini azaltarak daha az pürüzlü yüzeyler meydana getirir. Engin (2006), kayaç türüne göre yüzeyde oluşan pürüzlülüğün farklı olduğunu, bu farklılığın kayaçların kesmeye karşı gösterdikleri dirençle yakından ilgili olduğunu belirtmiştir. Araştırmacı, kesimi göreceli olarak zor olan kayaçlarda yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek değerler aldığını tespit etmiştir. Ek olarak, Karakurt vd. (2011b) tek eksenli basma dayanımı daha yüksek olan kayaçlarda daha pürüzlü yüzeyler elde etmişlerdir. Bunun yanında, porozite ve su emme için açıklanan durumun bir benzeri de ultrasonik dalga hızı için geçerlidir.

3.5.2. Sapma Açısı

Kesme yüzeylerinden ölçülen sapma açıları (β) ve standart sapmaları sırasıyla Tablo 3.49 ve 3.50’de verilmektedir.

Tablo 3.49. Sapma açısı değerleri, β (°)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	15,45	16,48	15,28	28,36	15,03	15,12	20,44	9,20
Lamprofir	22,01	20,33	20,15	31,04	18,79	21,59	27,41	12,85
Bazalt	21,19	20,08	20,05	32,11	19,39	22,39	27,90	13,10
Mermer	23,50	21,10	22,43	34,45	18,99	21,97	27,36	14,27
Traverten	20,06	21,07	20,01	33,37	20,22	22,00	26,79	13,55
Limra-1	17,50	18,96	17,51	27,20	16,47	15,31	20,27	8,18
Limra-2	17,20	14,70	15,35	29,69	15,44	15,04	26,15	8,36
Kayseri Tüf	17,62	14,29	13,09	26,40	16,93	16,75	24,42	8,50
Rize Tüf	14,08	14,82	14,70	27,99	14,28	15,22	22,55	9,05
Bayburt Tüf	15,30	14,00	14,95	28,91	14,16	16,25	25,66	10,10

Tablo 3.50. Sapma açısı (β) değerleri standart sapmalar (°)

Kayaç	Garnet	AOB	AOK	Çelik	Olivin	Zımpara	Cam	Plastik
Andezit	0,90	1,02	1,20	2,05	1,00	0,85	1,70	0,25
Lamprofir	1,78	1,75	1,77	1,98	1,28	1,82	2,18	0,52
Bazalt	1,85	1,62	1,70	2,52	1,35	1,85	2,27	0,50
Mermer	1,68	1,80	1,88	3,12	1,39	1,70	2,08	0,61
Traverten	1,52	1,58	1,80	3,05	1,78	1,74	2,11	0,45
Limra-1	1,12	1,25	1,14	2,10	1,28	1,20	1,78	0,38
Limra-2	1,05	1,12	1,08	2,25	1,09	1,18	2,18	0,25
Kayseri Tüf	1,20	1,27	0,88	2,85	1,35	1,28	2,15	0,22
Rize Tüf	0,82	1,02	1,10	2,75	1,20	1,30	1,72	0,52
Bayburt Tüf	0,95	0,92	0,95	3,04	1,25	1,32	1,85	0,65

Sapma açılarının geniş bir aralıkta değiştiği (8,18-34,45°) görülmektedir. En küçük sapma açısı değeri 8,18° ile aşındırıcı olarak plastiğin kullanıldığı Limra-1 kesiminden elde edilmiştir. En büyük sapma açısı değeri ise 34,45° ile aşındırıcı olarak çeliğin kullanıldığı mermer kesiminden ölçülmüştür. Standart sapmalar düşüktür. Bu da kesilen her kayaç numunesinde kesim yüzeyi boyunca gözlenen çizgilerin birbirlerinden farklı oranlarda sapmadığının ve hemen hemen aynı açılarda saptıklarının bir göstergesidir.

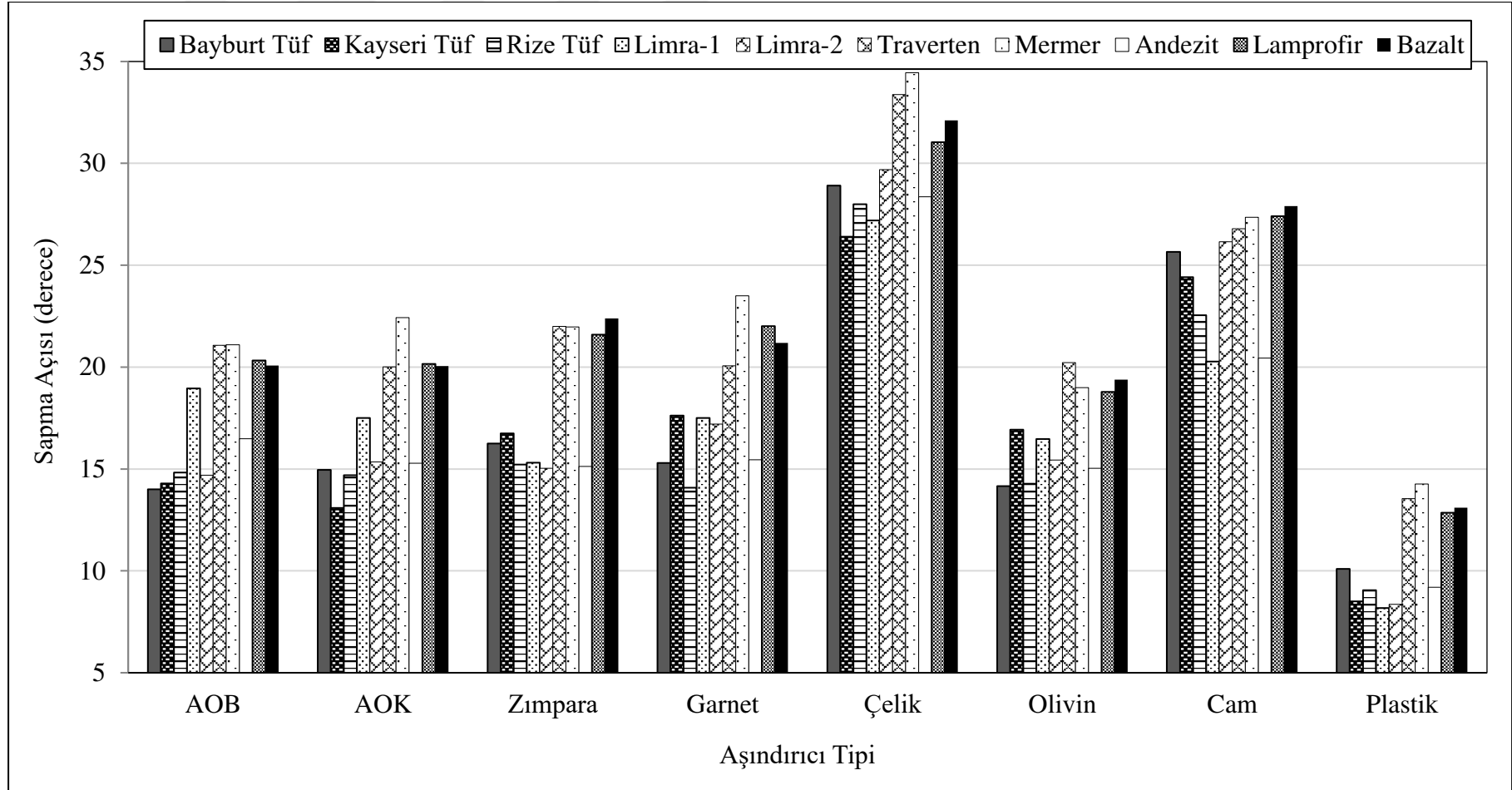
3.5.2.1. Aşındırıcı Özelliklerinin Sapma Açısına Etkileri

Sapma açıları temelinde aşındırıcıların performansı Şekil 3.81’de görülmektedir. Sapma açıları temelinde aşındırıcılar gruplandırılabilir. Kayaç tipine göre, en yüksek sapma açıları çelik ($26,40-34,45^\circ$) ile elde edilirken, onu cam takip etmektedir ($20,27-27,90^\circ$). En düşük sapma açıları plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerden elde edilmiştir ($8,18-14,27^\circ$). Diğer aşındırıcılarla ise nispeten birbirlerine yakın ve ortada sapma açıları elde edilmiştir ($14,00-23,5^\circ$). Tane şekli küresel olan aşındırıcıların sapma açılarını arttırdığı görülmektedir.

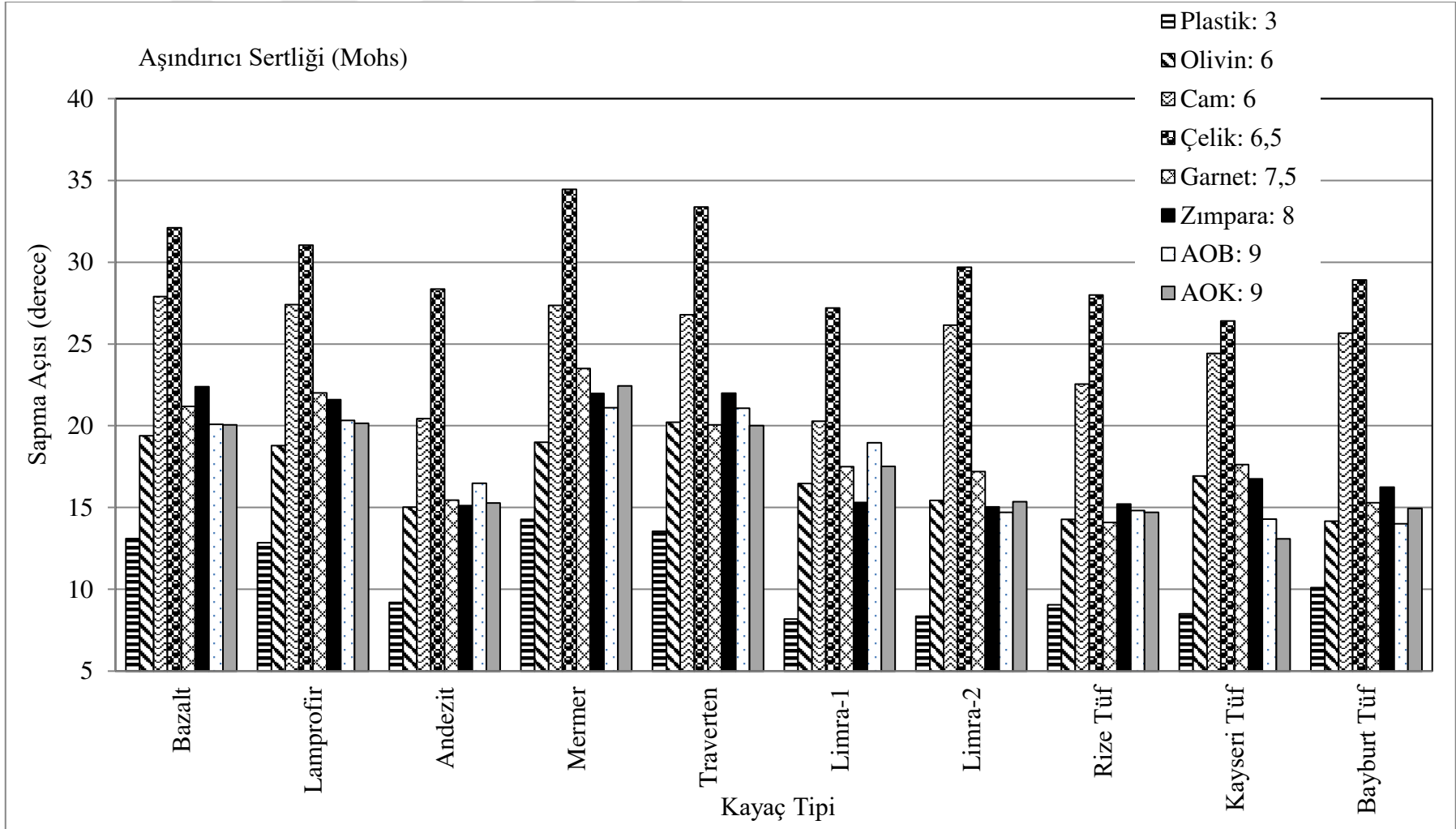
Şekil 3.82 ve Şekil 3.83’te sırasıyla aşındırıcıların sertliğine ve yoğunluğuna göre sapma açıları verilmektedir. Tablo 3.51’de ise aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarıyla sapma açıları arasındaki korelasyon katsayıları sunulmaktadır.

Tablo 3.51. Sapma açısı ve bazı aşındırıcı özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

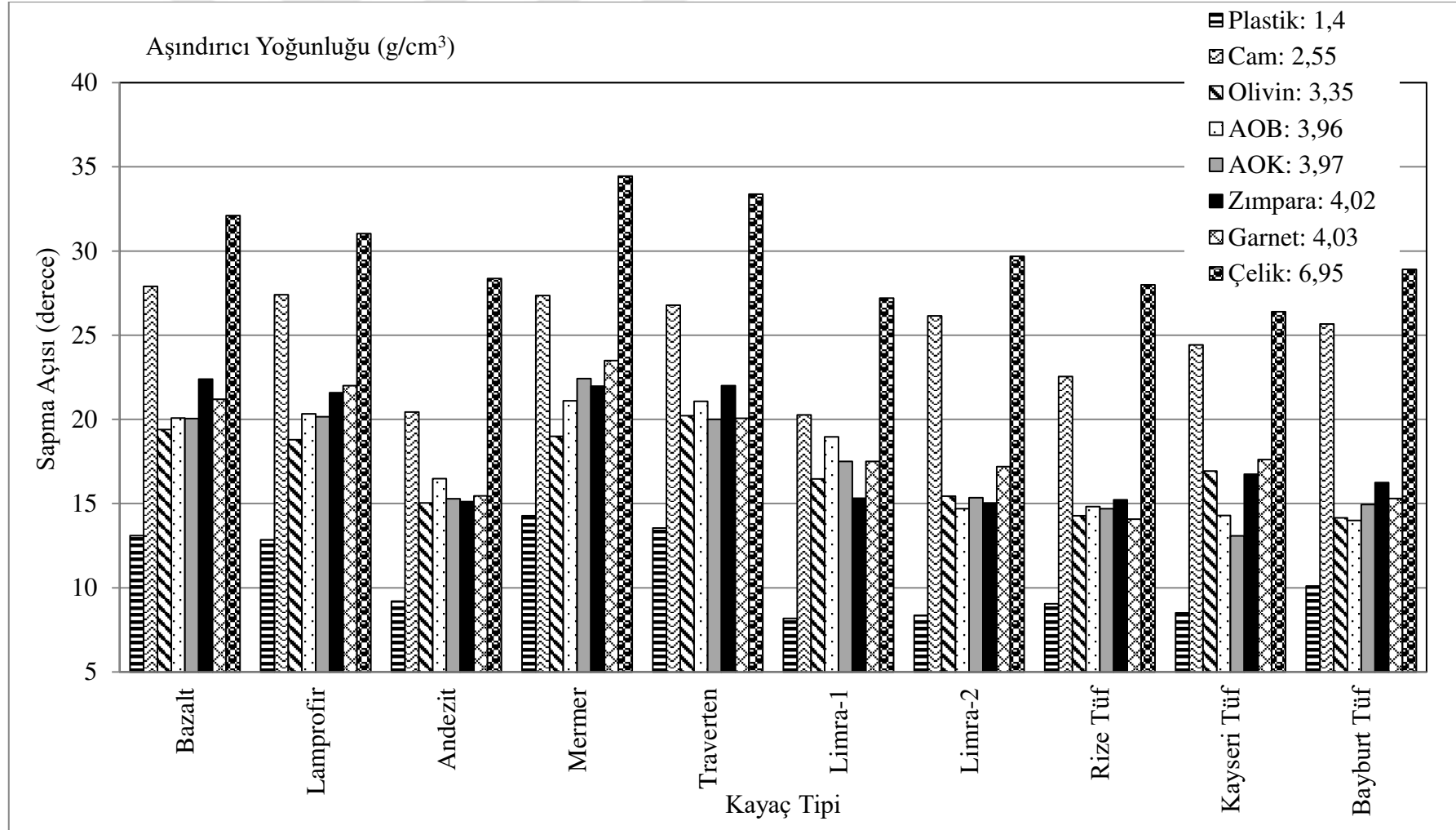
Aşındırıcı Özellği	Bazalt	Lamprofir	Andezit	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Rize Tüf	Kayseri Tüf	Bayburt Tüf
Sertlik (Mohs)	0,25	0,29	0,22	0,28	0,23	0,43	0,12	0,13	0,11	0,05
Yoğunluk (g/cm^3)	0,87	0,85	0,69	0,80	0,71	0,76	0,36	0,66	0,87	0,85



Şekil 3.81. Aşındırıcı tipine göre sapma açıları



Şekil 3.82. Aşındırıcı sertliğine göre sapma açıları

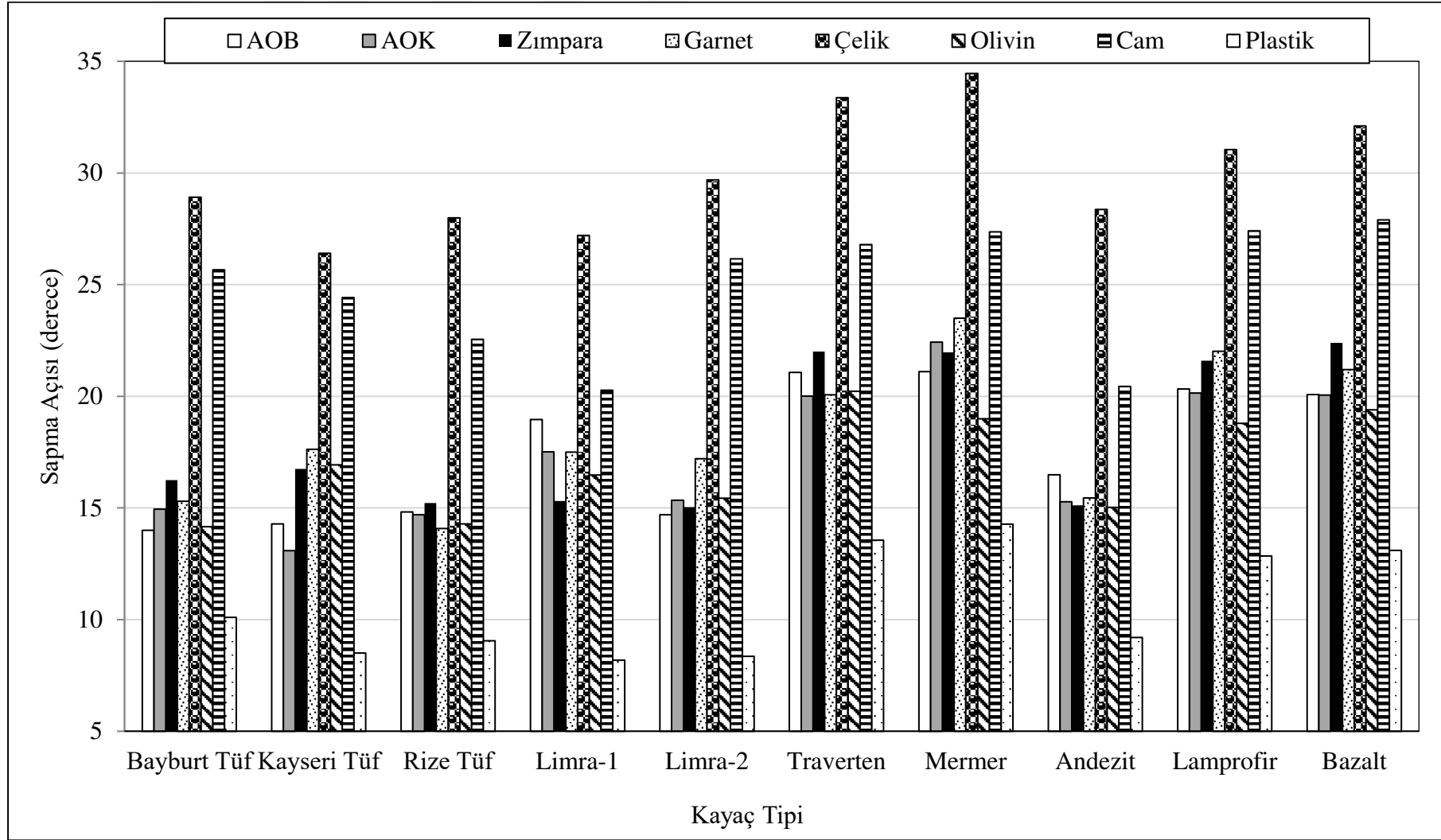


Şekil 3.83. Aşındırıcı yoğunluğuna göre sapma açıları

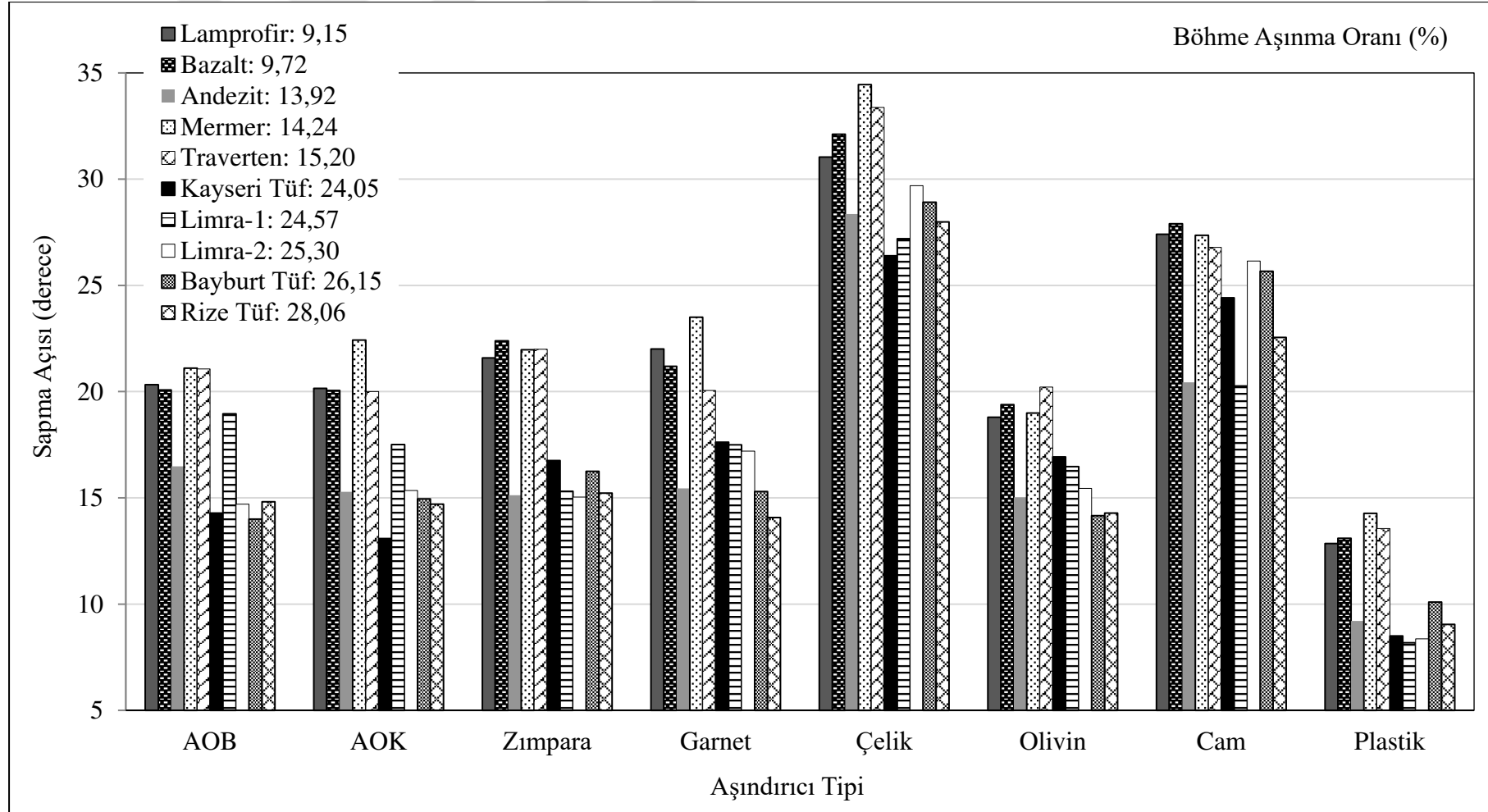
Yüzey pürüzlülüğünün aksine, aşındırıcı özelliklerinin sapma açısı üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Aşındırıcı sertliğinin etkisi zayıf olsa da genel olarak aşındırıcı sertlik ve yoğunluklarıyla sapma açıları arasında doğru orantılı ilişki olduğu tespit edilmiştir. Sapma açısı üzerinde esas etkili olan aşındırıcı özelliklerinin yoğunluk ve tane şekli (küresellik) olduğu görülmektedir. Yoğunluğu düşük aşındırıcıların darbe etkisi daha düşük olacaktır. Yüksek yoğunluklu aşındırıcılar içeren jet, kesme kafası ilerleme yönünde devam ederken kesik içinde geride halen kesme-aşındırma işlemine devam edip yüzeylere yüksek darbeye etkileyen bir parçasını bırakabilecektir. Böylece yüzeylerde oluşan çiziklerin sapması artacaktır. Küresel aşındırıcı tanelerin ise düzensiz şekilli tanelere göre kırılma/parçalanmaya karşı daha dirençli olacağı, kesme-aşındırma aktivitelerine daha uzun süre devam edecekleri düşünülebilir. Böylece geride kalan jette kerf içerisinde derinlerde halen yüzeylere etkileyerek çizik yapısının oluşmaya devam etmesine katkı sağlayabilirler. Bu durum daha yüksek sapma açısı meydana getirecektir. Kayaç tipine göre, sapma açılarıyla aşındırıcı yoğunlukları arasında orta-çok yüksek (istisna 1 adet $r: 0,36$ zayıf hariç, $r: 0,66-0,87$), aşındırıcı sertlikleri arasında ise çok düşük-orta ($r: 0,05-0,43$) korelasyonlu pozitif ilişkiler bulunmuştur. Konu kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, Hlavacova ve Geryk (2017) aşındırıcı özellikleriyle sapma açıları arasında net bir ilişki bulunmadığını belirtmişlerdir. Wang vd. (2021) ise sapma açısının birçok diğer parametreyle birlikte aşındırıcı tane ağırlığı ve tane boyutundan etkilendiğini ortaya koymuşlardır.

3.5.2.2. Kayaç Özelliklerinin Sapma Açısına Etkileri

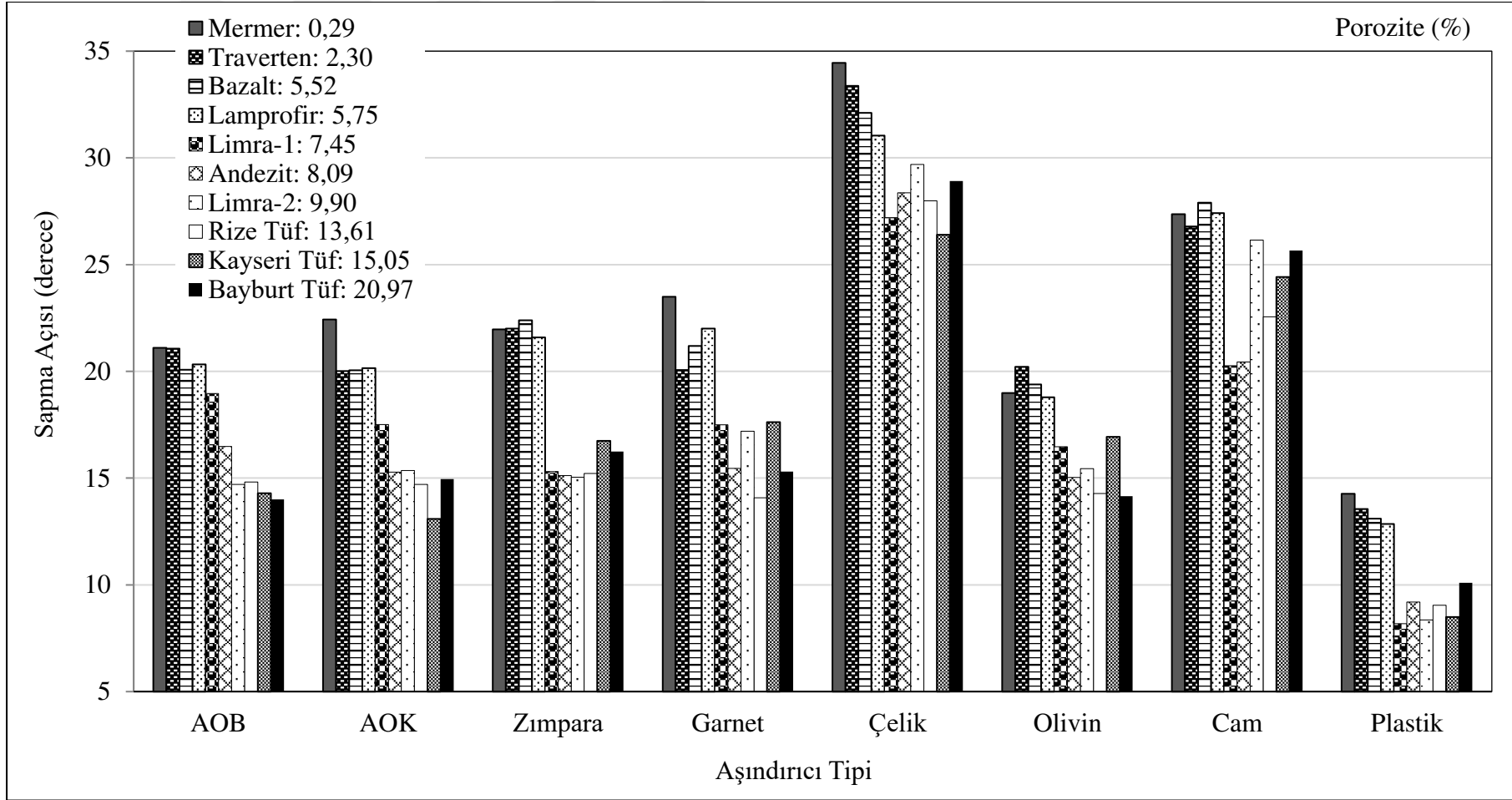
Kayaç tipine göre sapma açıları Şekil 3.84'te gösterilmektedir. En yüksek sapma açıları mermer ($14,27-34,45^\circ$) ve travertende ($13,55-33,37^\circ$) ölçülmüştür. Daha sonra bazalt ($13,10-32,11^\circ$) ve lamprofir ($12,85-31,04^\circ$) gelmektedir. Diğer kayaçlardan ise daha düşük ve birbirine yakın sapma açıları elde edilmiştir ($8,18-29,69^\circ$). Kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri temelinde sapma açıları ise Şekil 3.85-3.91'de verilmektedir. Tablo 3.52'de ise kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleriyle sapma açıları arasındaki korelasyon katsayıları yer almaktadır.



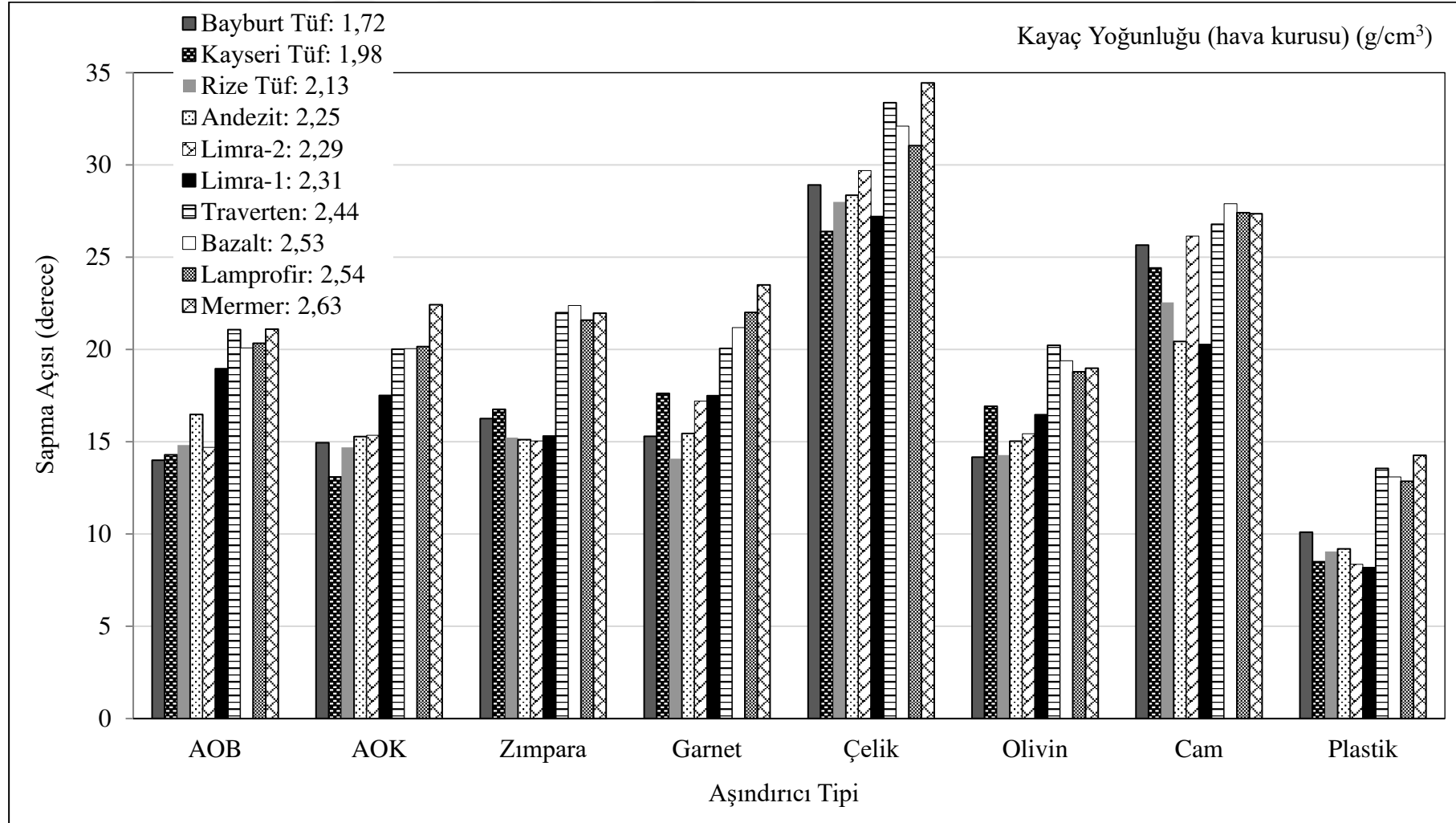
Şekil 3.84. Kayaç tipine göre sapma açıları



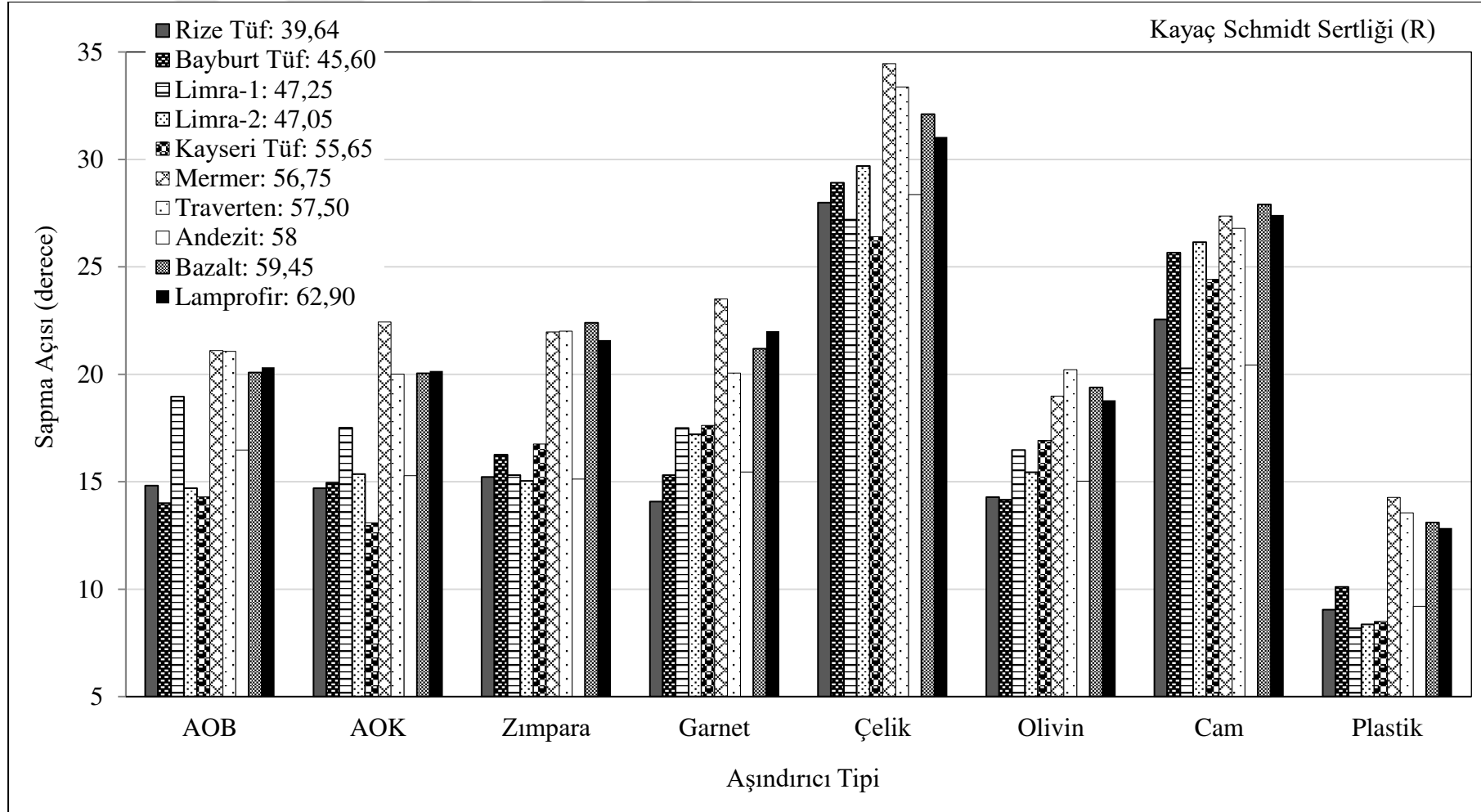
Şekil 3.85. Kayaçların Böhme aşınma kaybına göre sapma açıları



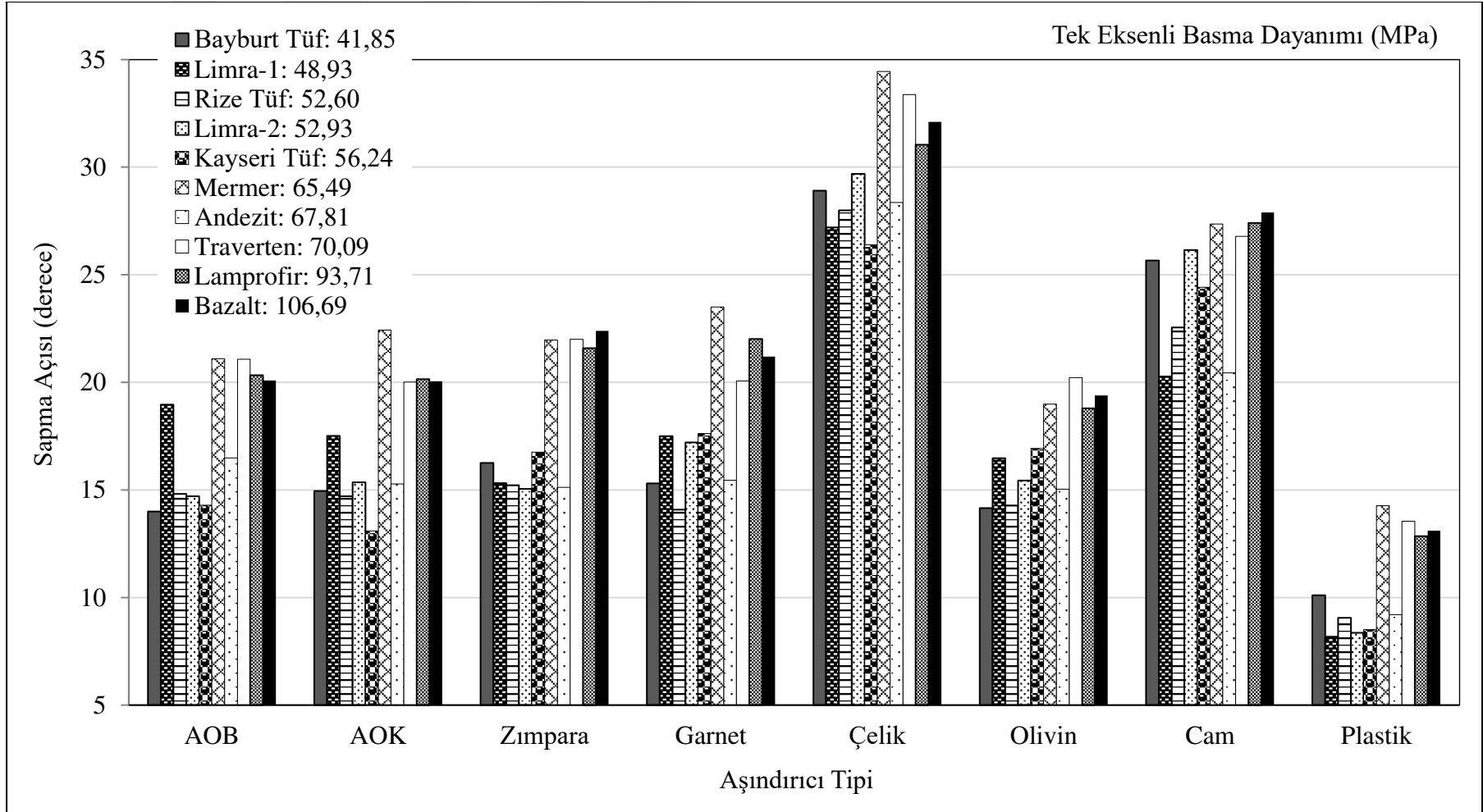
Şekil 3.86. Kayaçların porozitelerine göre sapma açıları



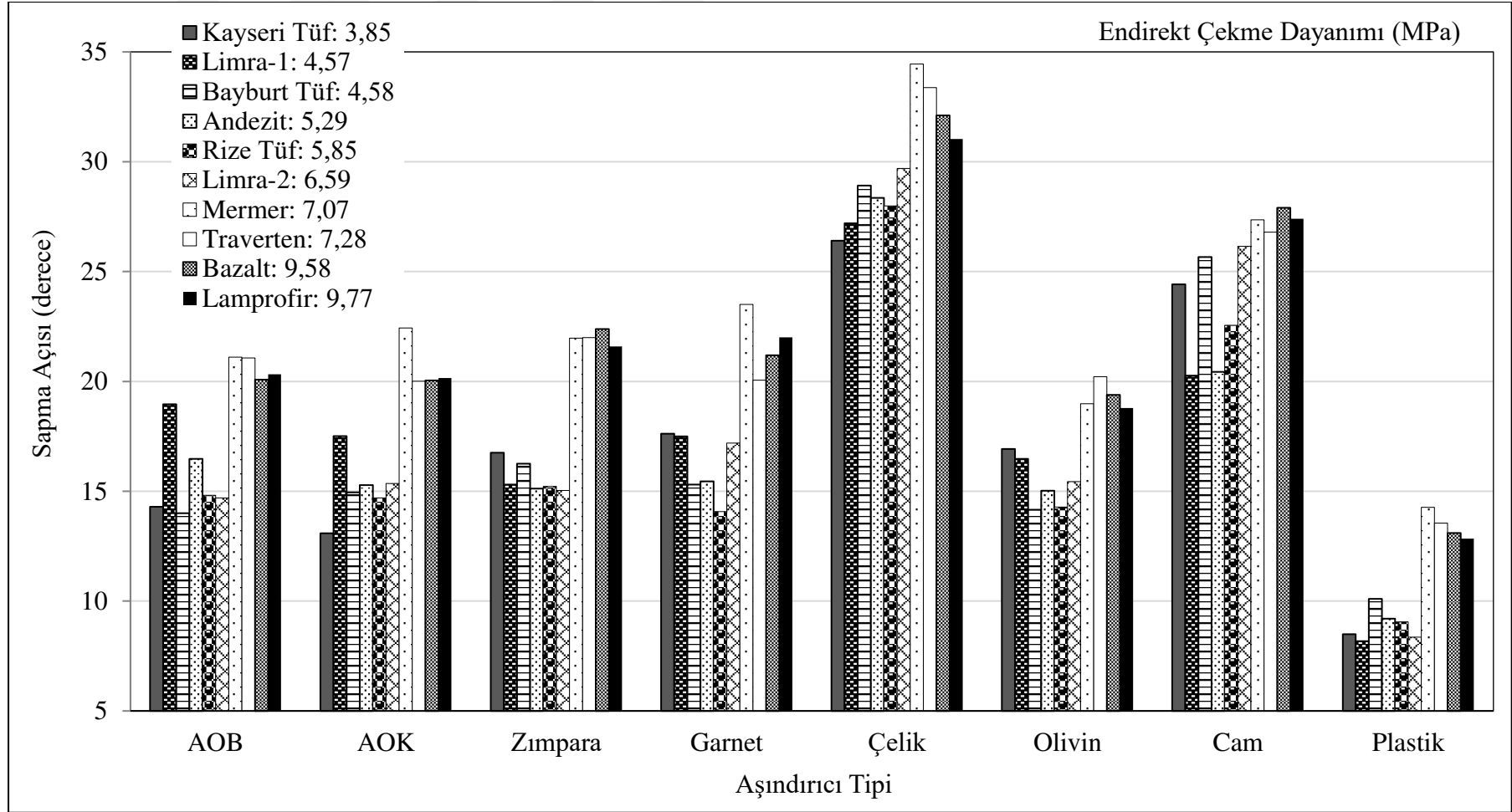
Şekil 3.87. Kayaçların doğal yoğunluklarına göre sapma açıları



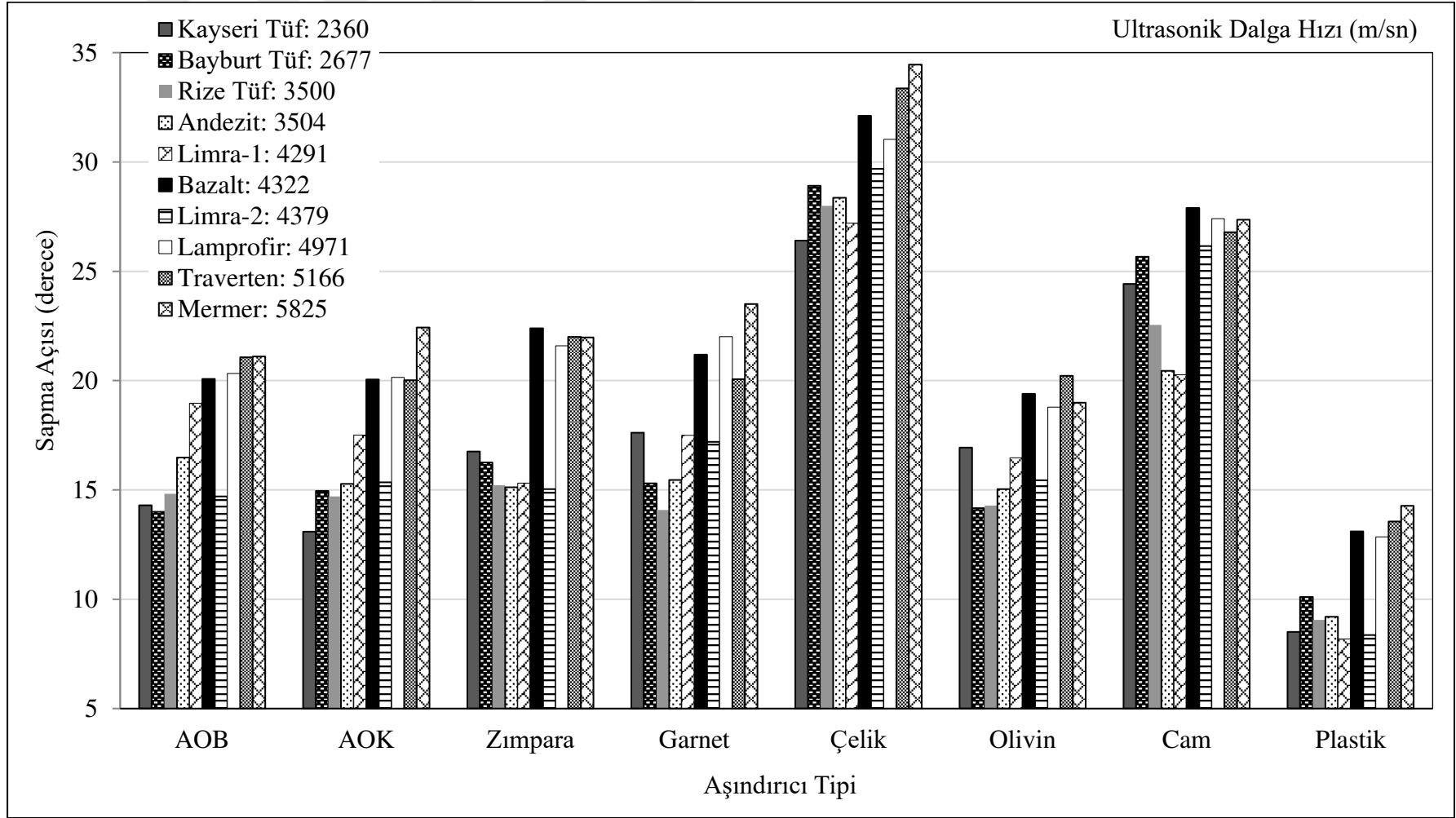
Şekil 3.88. Kayaçların Schmidt (klasik çekiç) sertlik değerlerine göre sapma açıları



Şekil 3.89. Kayaçların Tek Eksenli Basma Dayanımlarına göre sapma açıları



Şekil 3.90. Kayaçların Çekme Dayanımlarına göre sapma açıları



Şekil 3.91. Kayaçların ultrasonik p-dalga hızı değerlerine göre sapma açıları

Tablo 3.52. Sapma açısı ve kayaç özellikleri arasındaki korelasyon katsayıları

Aşındırıcılar	Böhme aşınma kaybı cm ³ /50 cm ²	Efektif porozite (%)	Ağırlıkça su emme oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Schmidt sertliği (Klasik)	Schmidt sertliği (Dijital)	Tek eksenli basma dayanımı (MPa)	Nokta yük dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Ultrasonik dalga hızı (m/s)
AOB	-0,78	-0,90	-0,85	0,87	0,64	0,67	0,65	0,68	0,68	0,86
AOK	-0,74	-0,85	-0,77	0,85	0,56	0,60	0,61	0,64	0,74	0,90
Zımpara	-0,79	-0,67	-0,60	0,69	0,72	0,74	0,76	0,78	0,78	0,67
Garnet	-0,75	-0,77	-0,72	0,80	0,73	0,74	0,66	0,69	0,70	0,77
Çelik	-0,66	-0,73	-0,64	0,71	0,50	0,59	0,53	0,55	0,71	0,83
Olivin	-0,75	-0,79	-0,75	0,76	0,76	0,79	0,70	0,74	0,67	0,70
Cam	-0,45	-0,28	-0,22	0,36	0,43	0,46	0,51	0,54	0,69	0,44
Plastik	-0,77	-0,66	-0,57	0,66	0,64	0,67	0,66	0,69	0,74	0,71

Sapma açılarıyla kayaç özellikleri arasında anlamlı ilişkiler görülmektedir. Sapma açıları kayaçların Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranlarıyla ters; yoğunluk, sertlik, dayanım ve ultrasonik hız değerleriyle doğru orantılı bir eğilim göstermektedir. Kayaç özelliklerinin sapma açısı üzerindeki etkilerinin kerf açılarıyla aynı; kesme derinlikleri, malzeme uzaklaştırma oranı ve yüzey pürüzlülükleriyle zıt bir eğilimde olduğu belirlenmiştir. Basit bir ifadeyle, kesimi zorlaştıran kayaç özelliklerinin (sertlik, yoğunluk, dayanım, ultrasonik hız) değerlerinin artışı sapma açılarını arttırmakta, kesimi kolaylaştıran kayaç özelliklerinin (Böhme aşınma kaybı, porozite, su emme oranı) artışı ise sapma açılarını azaltmaktadır. Literatürde, ASJ ile kesimde kesilen numune özelliklerinin sapma açısına etkisine yönelik neredeyse hiçbir çalışmaya rastlanılmamıştır. Konuya yönelik sınırlı çalışmalardan birinde sapma açısının, malzemenin (cam, titanyum, alüminyum, bakır, kurşun, çelik, pleksi ve mermer) sertliğinden etkilendiği belirtilmiştir (Ergür, 2007).

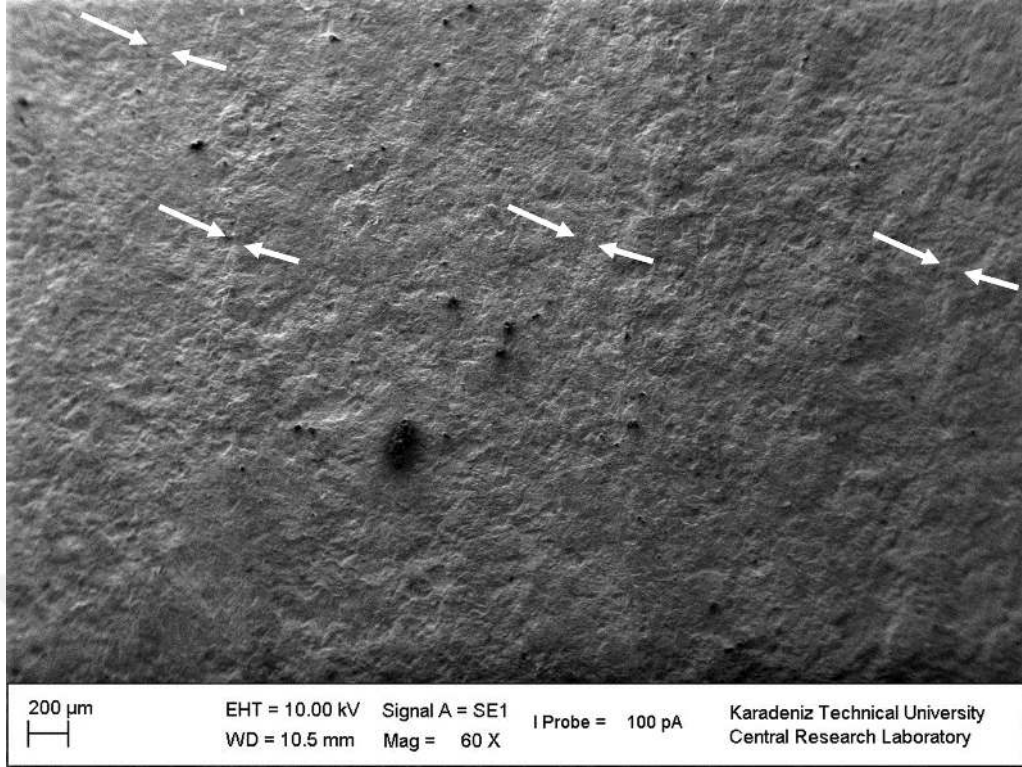
3.5.3. SEM Analizleri

SEM görüntüleri üzerinde elde edilen bulgular ve yapılan değerlendirmeler şu şekildedir:

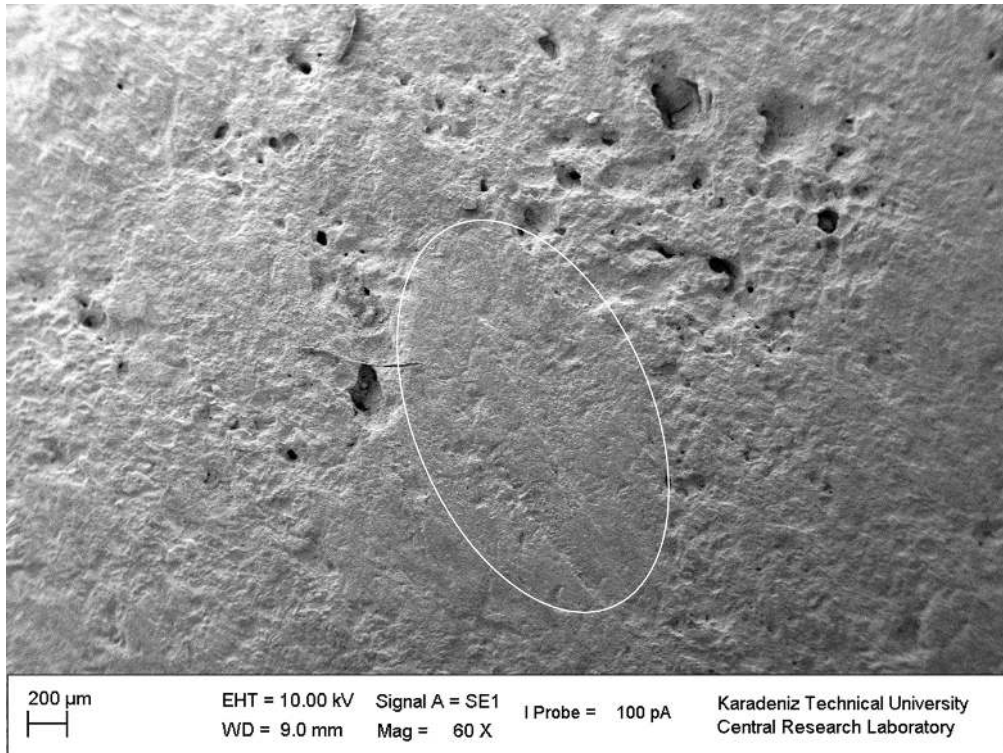
- i. Kesim yüzeylerinde dik yörüngede, kesimin ilerleme yönünün tersine doğru sapan aşındırıcı tane izleri gözlemlenmiştir (Şekil 3.92). Yalnızca, plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesme yüzeylerinde bu izlere rastlanmamıştır. Bu olgu, plastikte etkili bir kesim yapılmadığının göstergelerinden birisi olarak değerlendirilebilir.
- ii. Hem sünek hem de kırılğan deformasyonlara rastlanmasına rağmen ağırlıklı olarak düşük sertlikte ve poroz kayaçlarda sünek (Şekil 3.93), sert ve boşluk oranı düşük kayaçlarda kırılğan deformasyonlar (Şekil 3.94) gözlemlenmiştir.
- iii. Jet içerisindeki aşındırıcı tanelerin neden olduğu mikro-sabanlama (ploughing) aşınmaları gösteren morfolojik yapılara rastlanmıştır (Şekil 3.95). Bu yapılar da kesimlerde genel olarak izlenmesine rağmen düşük sertlikteki kayaçlarda daha fazla göze çarpmaktadır.
- iv. Aşındırıcı tanelerin kayaçtan kopardıkları parçalara da rastlanmıştır (Şekil 3.96-3.97). Bu parçalar yüzeyden kopup sürüklenerek kayaç yüzeyinde süpürerek kesme (smeared) denilen bir mikro mekanizmayla kesme işlemi gerçekleştirirler (Karakurt, 2011). Böyle bir etkinin rastlandığı örnek bir yüzey, Şekil 3.98’de gösterilmiştir. Ayrıca kalkerli kayaçlarda, özellikle mermer ve travertende, yerinden kopan eşkenar dörtgen şekilli kalsit tanelerinin bıraktığı boşluklar da gözlemlenmektedir (Şekil 3.99).
- v. Sabanlama ve süpürme dışında nadir olarak keskin/derin kesilme izlerine rastlanmıştır (Şekil 3.100).
- vi. Bazı yüzeylerde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu çatlaklar matriksten ziyade mineral tane içleri ya da sınırlarında gözlemlenmiştir (Şekil 3.101).
- vii. Yüzeyin çeşitli yerlerine dağılmış ya da özellikle boşluklu kayaçlarda mikro kraterler/boşluklar içerisine sıkışmış, ufalanmış aşındırıcı tane artıkları tespit edilmiştir (Şekil 3.102-3.103). Bu taneler, kullanılan aşındırıcı boyutundan çok daha fazla küçüktür ($<20 \mu\text{m}$). Bu tanelerin kesme sırasında çarpma-sürtme-aşınma ve türbülans etkisiyle aşındırıcıdan kopan ve kinetik enerjisi düşük (kesme işlemi yapamayacak kadar) olan aşındırıcı artıkları olduğu düşünülmektedir.
- viii. Yukarıda bahsedilen olgu ve şekillere plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı kesimlerde yok denecek kadar az rastlanılmıştır (Şekil 3.104).
- ix. SEM incelemeleri, aynı zamanda yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin yapıldığı kesme-aşınma bölgesinden alınan örnekler üzerinde gerçekleştirildiği için pürüzlülüğü çok düşük ve çok yüksek yüzeyler, SEM görüntülerinden de anlaşılabilmektedir (Şekil 3.105-106).

- x. Porozitesi yüksek kayalarda kesme yüzeylerinde fazlaca kraterler-çukurlar-boşluklar görmek mümkündür.

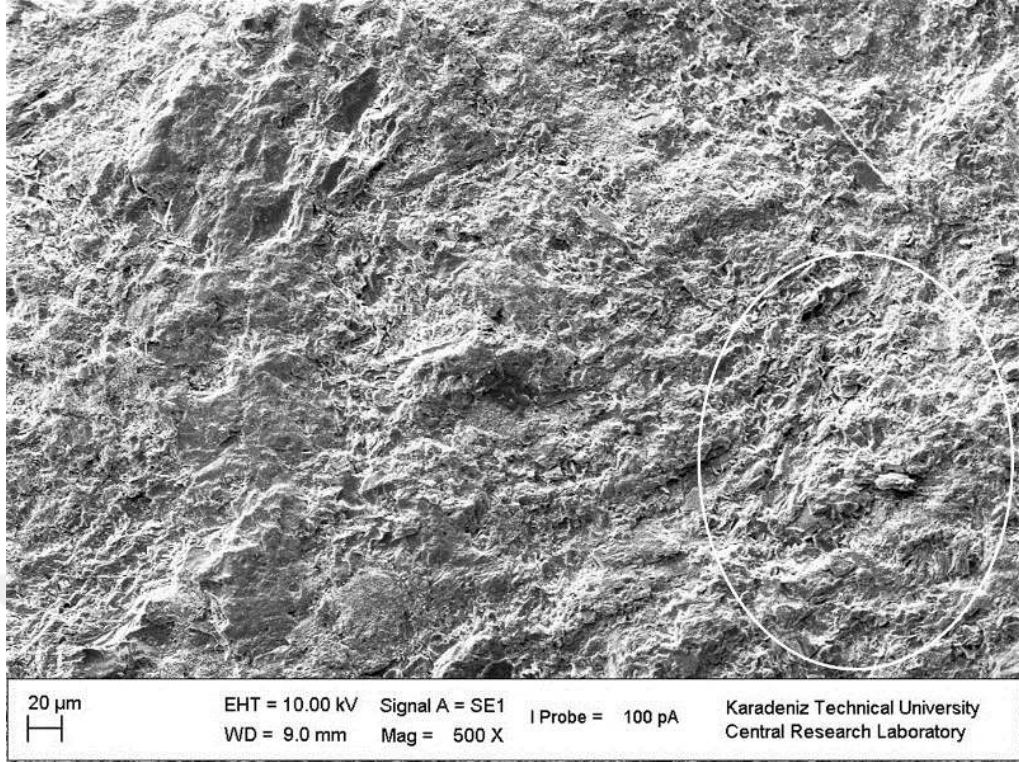
Miranda ve Quintino (2005), sert kayalarda kalsit taneleri arasında çatlama ve bölünmeler, sertliği düşük kayalarda ise taneler arası çatlama ve killi matriks boyunca matriks ve taneler arasında kayan malzeme ile kesilme mekanizmaları gözlemlemişlerdir. Ayrıca, porozitesi yüksek kayalarda kraterler ve plastik deformasyonlar görüntülemişlerdir. Karakurt (2011), yüzeylerde mikro-sabanlama, süpürerek kesme etkileri, kayaç yüzeyinden ya da aşındırıcı tanelerden kopup sıkışan parçalar (özellikle orta ve ince taneli kayalarda), keskin kesilme izleri (özellikle iri taneli kayalarda) ve taneler arası sınırdan kopma ve tane içerisinde mikro-çatlama tespit etmiştir. İnal (2011), hem sünek (özellikle ince taneli granitte) hem kırılğan (özellikle orta-iri taneli granitlerde) deformasyonlara rastlamıştır. Deformasyonların özellikle sabanlama, derin çizilme ve aşındırıcı tanelerin kesme yüzeyine batma-çakılma-parça koparma mekanizmalarıyla gerçekleştiğinin altını çizmiştir. Çalışmada ayrıca, kesimin dibine doğru aşındırıcı tane çakılmalarının arttığı gözlemlenmiştir. Aksu (2012), yüzeylerin çeşitli yerlerine dağılmış-saplanmış aşındırıcı taneleri, yüzeyden koparılmış parçacıklar, mikro çatlaklar ve kesme izleri gözlemlemiştir. Anlaşılacağı gibi bu çalışmada elde edilen bulgular literatürdeki bulgularla örtüşmektedir.



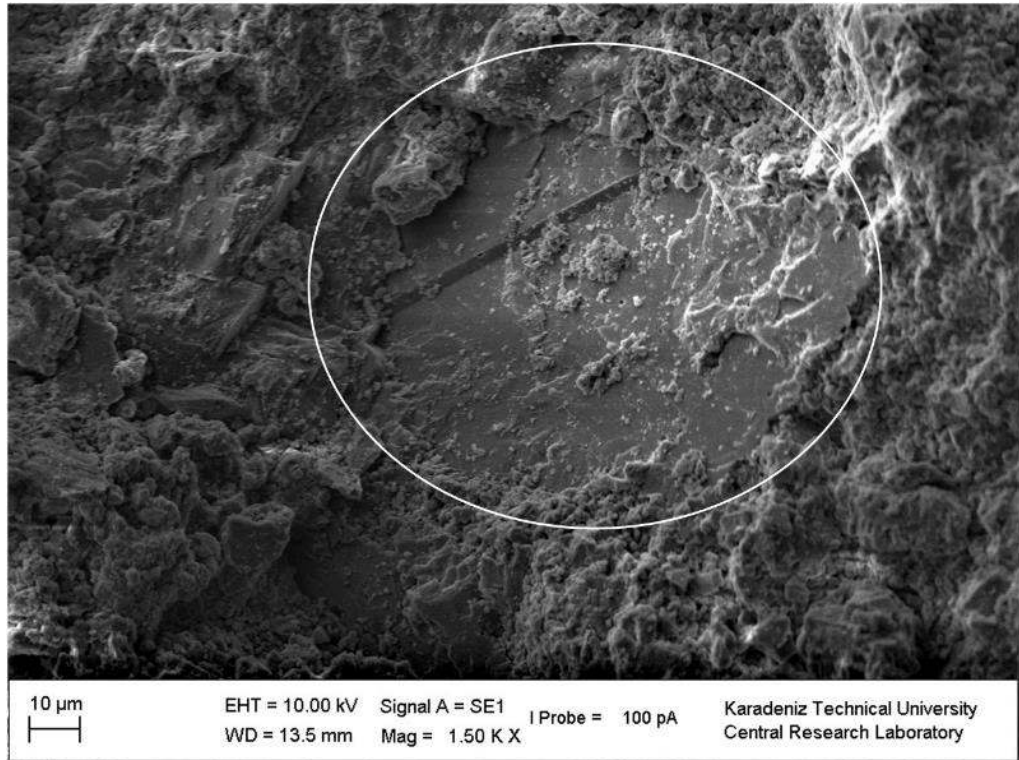
Şekil 3.92. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde aşındırıcı tane çizgi izleri (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet)



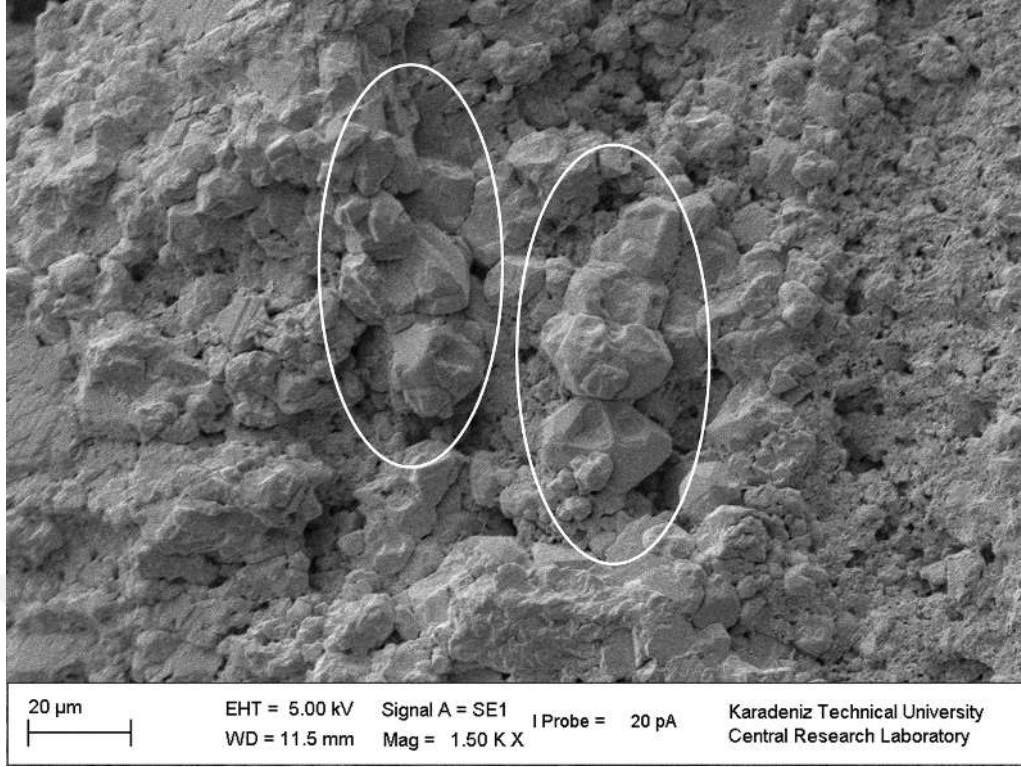
Şekil 3.93. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde sünek deformasyon (Kayaç: Rize tüf, Aşındırıcı: Garnet)



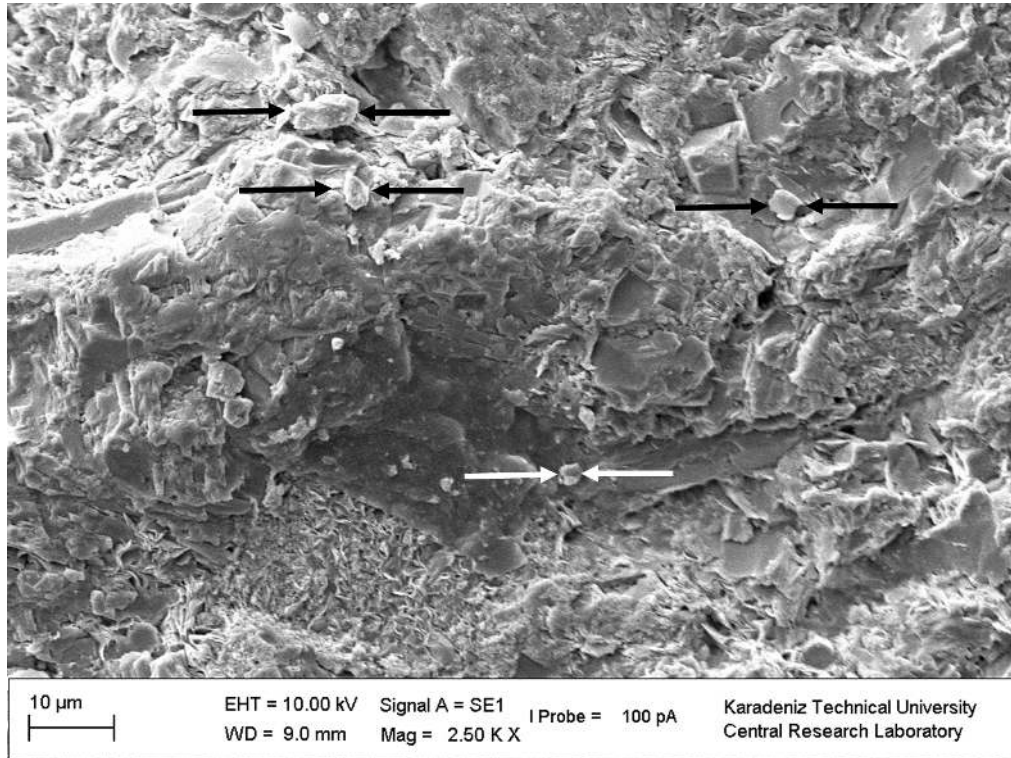
Şekil 3.94. SEM görüntüsünde kesim yüzeyinde kırılğan deformasyon (Kayaç: Bazalt, Aşındırıcı: Garnet)



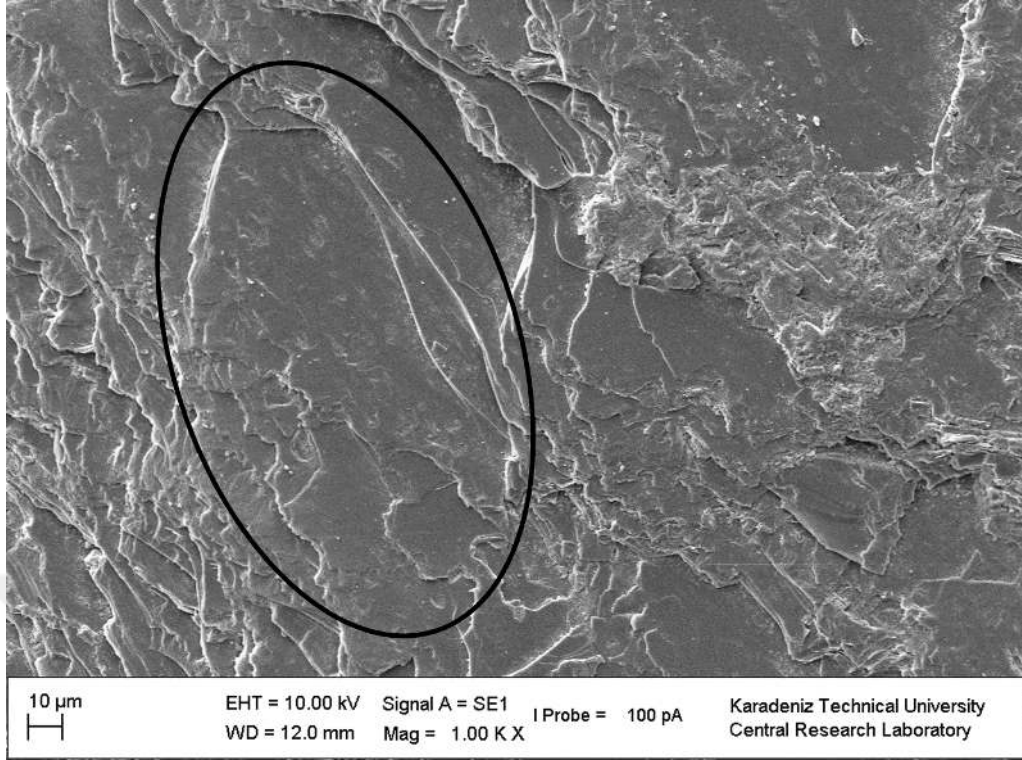
Şekil 3.95. SEM görüntüsünde mikro sabanlama (ploughing) (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Garnet)



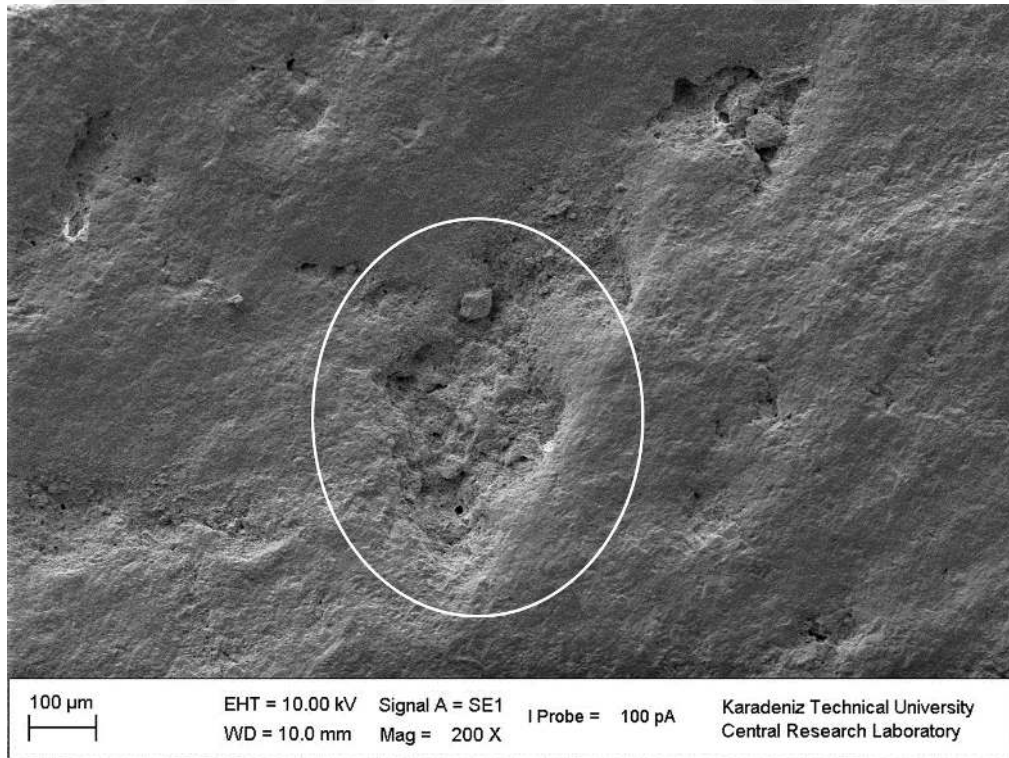
Şekil 3.96. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinden kopan ve çakılan parçacıklar (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Cam)



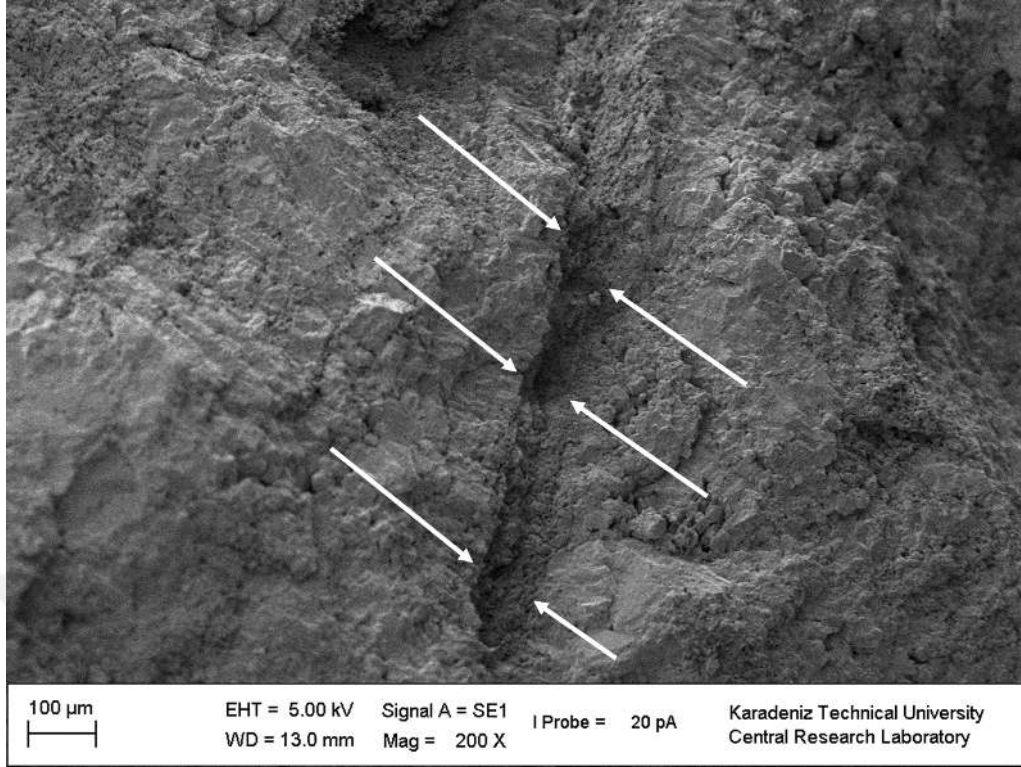
Şekil 3.97. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinden kopan ve sürüklenen parçacıklar (Kayaç: Bazalt, Aşındırıcı: Garnet)



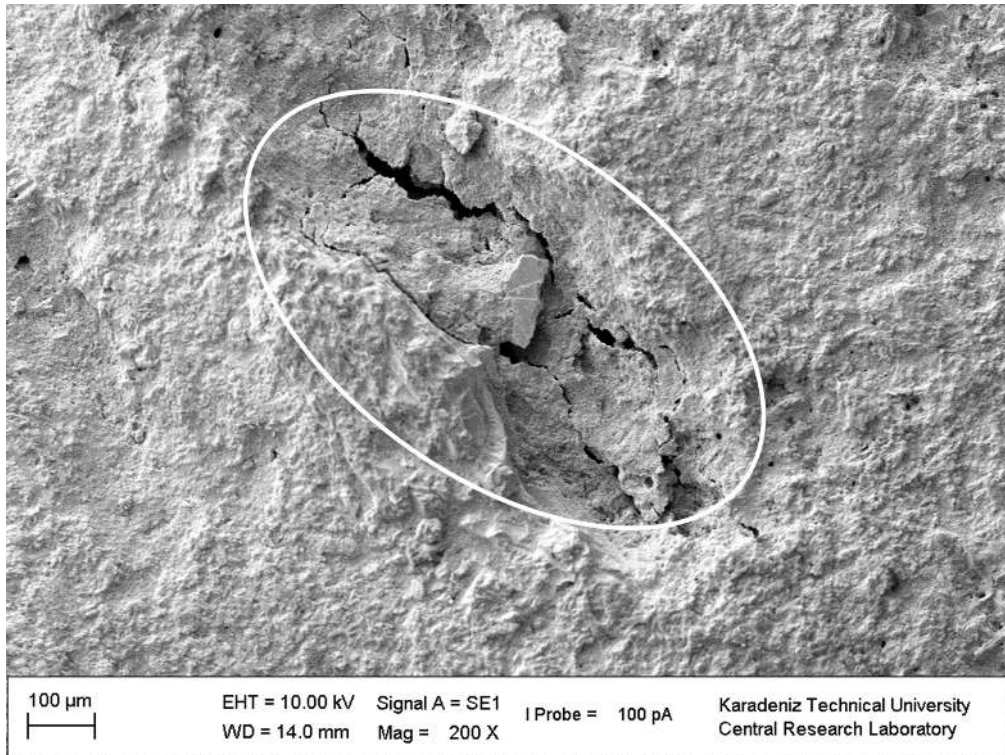
Şekil 3.98. SEM görüntüsünde kayaç yüzeyinde süpürerek kesme (smeared) (Kayaç: Lamprofir, Aşındırıcı: Garnet)



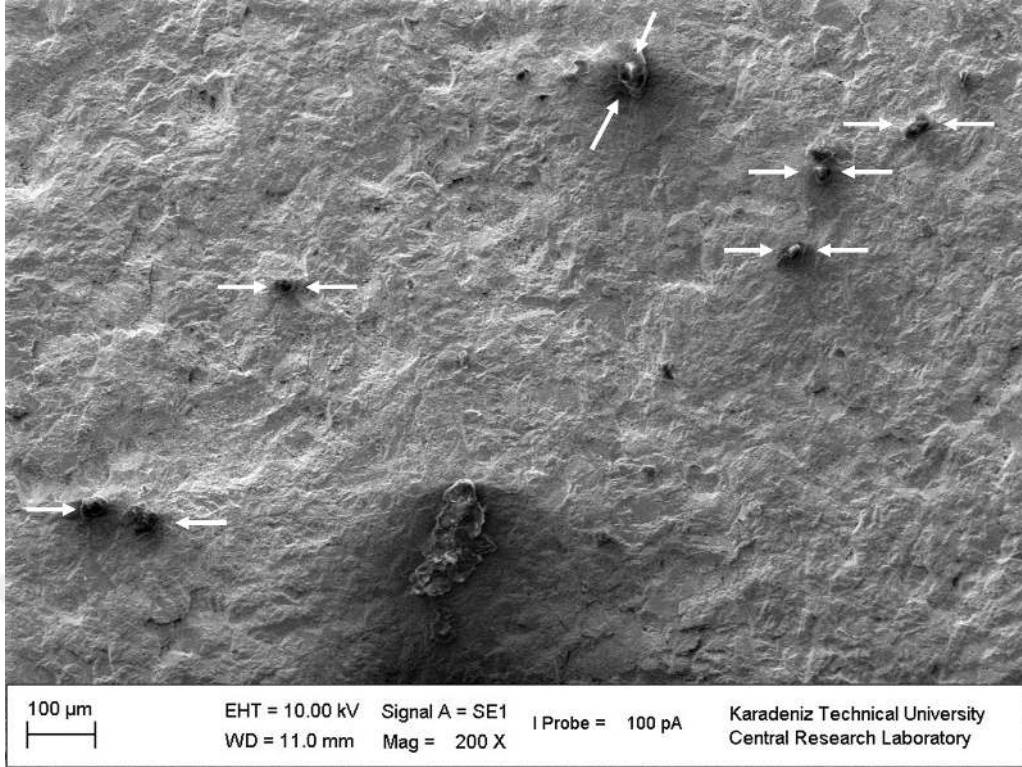
Şekil 3.99. SEM görüntüsünde yüzeyden kopan kalsit tanesinin bıraktığı boşluk (Kayaç: Traverten, Aşındırıcı: Garnet)



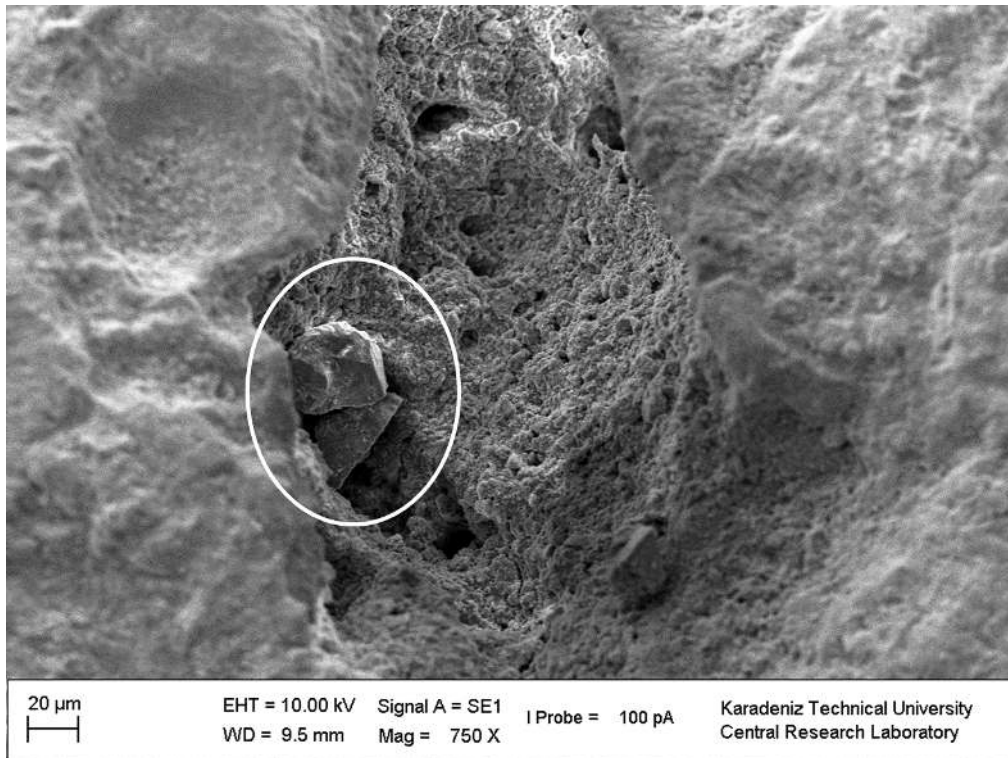
Şekil 3.100. SEM görüntüsünde kesme yüzeyinde derin kesilme (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Olivin)



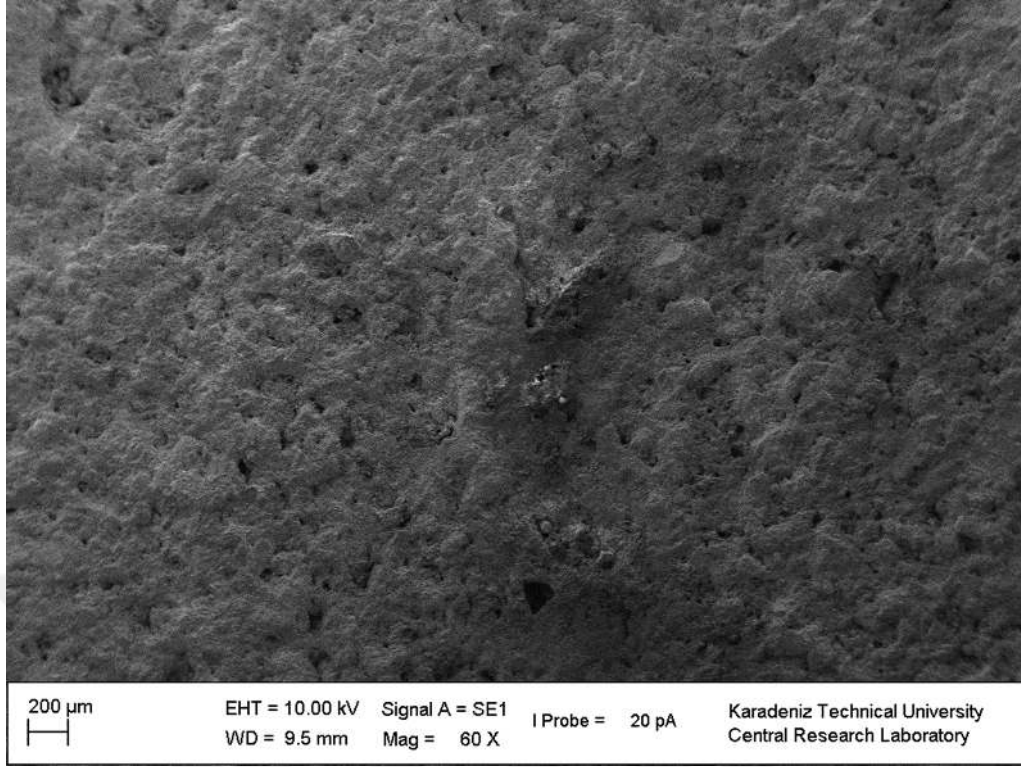
Şekil 3.101. SEM görüntüsünde mineral tanesinde mikro çatlak (Kayaç: Bayburt tuf, Aşındırıcı: Garnet)



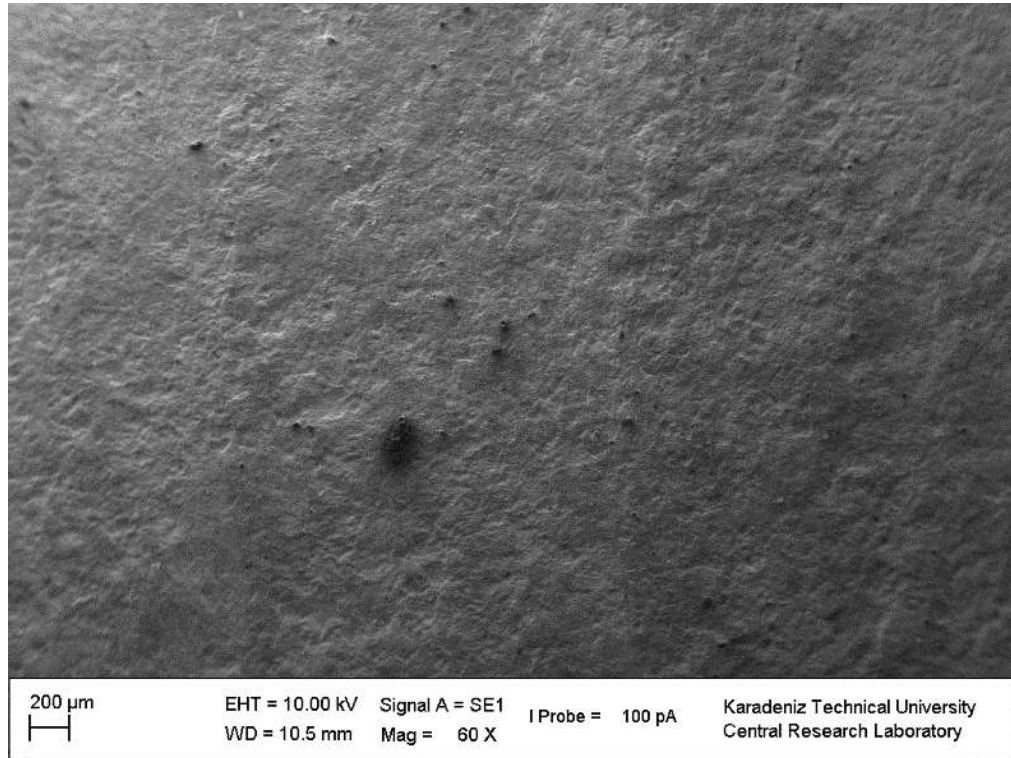
Şekil 3.102. SEM görüntüsünde kesim yüzeyine dağılmış aşındırıcı taneler (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet)



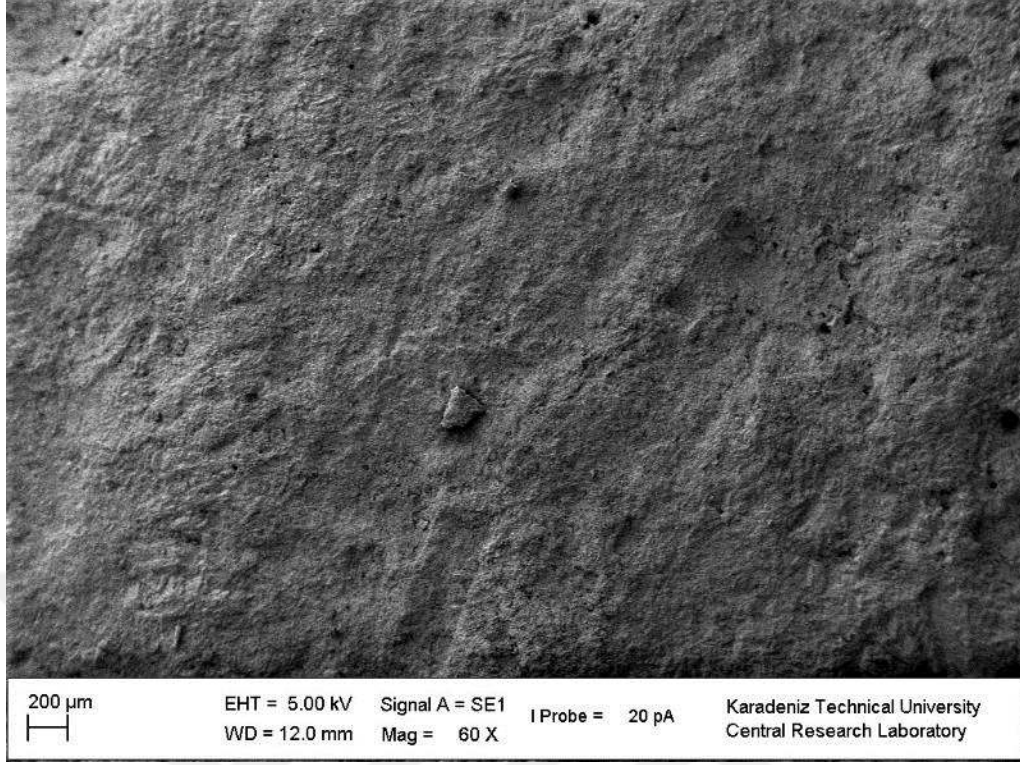
Şekil 3.103. SEM görüntüsünde kayaç boşluğunda sıkışmış aşındırıcı taneler (Kayaç: Rize tuf, Aşındırıcı: Garnet)



Şekil 3.104. Plastiğin aşındırıcı olarak kullanıldığı örnek bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Plastik)



Şekil 3.105. Pürüzlülüğü düşük bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü, R_a : 4,85 μm (Kayaç: Mermer, Aşındırıcı: Garnet)



Şekil 3.106. Pürüzlülüğü yüksek bir kesim yüzeyinin SEM görüntüsü, R_a : 12,37 μm (Kayaç: Limra, Aşındırıcı: Cam)

3.6. Kesme Performans Ölçütleri Arasındaki İlişkiler ve Aşındırıcıların Garnete Göre Performans Karşılaştırması

Tablo 3.53'te, çalışmada elde edilen tüm kesme performans kriterleri arasındaki korelasyon katsayıları verilmiştir.

Performans ölçütlerinden bir grupta; kesme derinlikleri, malzeme uzaklaştırma oranı, çakılma bölgesi genişliği ve yüzey pürüzlülüğünün birbirleriyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde diğer grupta, kerf açısı ve sapma açısının da birbirleriyle doğru orantılı olduğu görülmektedir. Bu iki grubun aralarında ise ters orantılı ilişkiler bulunmaktadır. Kesme genişleri ise anlamlı bir eğilim göstermemektedir

Tablo 3.53. Kesme performans ölçütlerinin birbirleri arasındaki korelasyon katsayıları

	Malzeme uzaklaştırma oranı	Kesme derinliği	Kesme-aşınma derinliği	Çakılma bölgesi derinliği	Kesme genişliği	Çakılma bölgesi genişliği	Giriş kerf açısı	Çıkış kerf açısı	R _a , yüzey pürüzlük değeri	R _q , yüzey pürüzlük değeri	R _z , yüzey pürüzlük değeri	Sapma açısı
Malzeme uzaklaştırma oranı	1	0,98	0,97	0,97	0,38	0,55	-0,76	-0,76	0,53	0,50	0,56	-0,74
Kesme derinliği	0,98	1	0,98	0,95	0,26	0,49	-0,79	-0,79	0,53	0,49	0,56	-0,75
Kesme-aşınma derinliği	0,97	0,98	1	0,94	0,26	0,39	-0,76	-0,77	0,48	0,45	0,51	-0,64
Çakılma bölgesi derinliği	0,97	0,95	0,94	1	0,36	0,51	-0,66	-0,70	0,44	0,39	0,47	-0,70
Kesme genişliği	0,38	0,26	0,26	0,36	1	0,44	-0,06	0,21	0,03	0,01	0,03	-0,08
Çakılma bölgesi genişliği	0,55	0,49	0,39	0,51	0,44	1	-0,39	-0,35	0,45	0,44	0,45	-0,66
Giriş kerf açısı	-0,76	-0,79	-0,76	-0,66	-0,06	-0,39	1	0,71	-0,53	-0,54	-0,53	0,64
Çıkış kerf açısı	-0,76	-0,79	-0,77	-0,70	0,21	-0,35	0,71	1	-0,69	-0,67	-0,72	0,81
R _a , yüzey pürüzlük değeri	0,53	0,53	0,48	0,44	0,03	0,45	-0,53	-0,69	1	0,99	1,00	-0,82
R _q , yüzey pürüzlük değeri	0,50	0,49	0,45	0,39	0,01	0,44	-0,54	-0,67	0,99	1	0,99	-0,78
R _z , yüzey pürüzlük değeri	0,56	0,56	0,51	0,47	0,03	0,45	-0,53	-0,72	1,00	0,99	1	-0,83
Sapma açısı	-0,74	-0,75	-0,64	-0,70	-0,08	-0,66	0,64	0,81	-0,82	-0,78	-0,83	1

Tablo 3.54'te ise her bir aşındırıcının ilgili performans göstergesi açısından başarı sırası sunulmaktadır. Çalışmada kullanılan aşındırıcıların, garnet ile daha detaylı bir biçimde kıyaslanabilmesi için, garnetin performans ölçütleri temelinde kesme performansı 1 olarak kabul edilmiş ve kalan aşındırıcıların garnete göre performansları oransal olarak hesaplanmıştır (Tablo 3.55).

Tablo 3.54. Aşındırıcıların kesme performans ölçütlerine göre sıralaması

Performans Kriteri	Çelik	AOB	AOK	Garnet	Cam	Zımpara	Olivin	Plastik
Kesme derinliği (h_t)	1	2	3	4	5	6	7	8
Kesme-aşınma derinliği (h_a)	1	2	3	4	5	7	6	8
Çakılma bölgesi derinliği (h_c)	1	2	3	5	6	7	4	8
Malzeme uzaklaştırma oranı (V_m)	1	4	3	5	2	7	6	8
Kesme genişliği (W)	7	1	2	3	8	5	6	4
Çakılma bölgesi genişliği (W_c)	8	5	6	4	7	1	2	3
Giriş kerf açısı (Θ_g)	1	2	3	4	6	7	5	8
Çıkış kerf açısı (Θ_c)	1	2	3	4	5	6	7	8
Yüzey pürüzlülüğü (R_a)	7	3	5	1	6	4	2	-
Sapma açısı (β)	8	4	3	6	7	5	2	1

1: En iyi, 8: En kötü

Tablo 3.55. Aşındırıcıların garnete göre performansları

Performans Kriteri	Çelik	AOB	AOK	Garnet	Cam	Zımpara	Olivin	Plastik
Kesme derinliği (h_t)	1,28	1,18	1,12	1	0,79	0,67	0,67	0,21
Kesme-aşınma derinliği (h_a)	1,38	1,33	1,26	1	0,81	0,78	0,79	0,25
Çakılma bölgesi derinliği (h_c)	1,69	1,15	1,14	1	0,95	0,78	1,08	0,46
Malzeme uzaklaştırma oranı (V_m)	2,59	1,26	1,28	1	1,34	0,80	0,95	0,32
Kesme genişliği (W)	1,26	0,88	0,99	1	1,44	1,12	1,17	1,03
Çakılma bölgesi genişliği (W_c)	1,99	1,07	1,10	1	1,47	0,89	0,97	0,98
Giriş kerf açısı (Θ_g)	0,07	0,44	0,66	1	1,49	2,63	1,51	7,59
Çıkış kerf açısı (Θ_c)	0,38	0,60	0,75	1	1,04	1,23	1,31	3,20
Yüzey pürüzlülüğü (R_a)	1,23	1,11	1,14	1	1,19	1,12	1,07	-
Sapma açısı (β)	1,63	0,96	0,94	1	1,35	0,99	0,92	0,58

Çelik, garnete göre kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve kerf açısı yönünden daha iyi bir performans sergilemiştir. Ancak, kesme genişliği ve yüzey kalitesi açısından garnet ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Alüminyum oksitler ise birbirlerine yakın performans sergilemişler; garnete göre kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı, kesme genişliği, kerf açısı ve sapma açısı yönünden daha iyi performans sunmuşlardır. Cam ise yalnızca malzeme uzaklaştırma oranında (%34) garnetten daha iyi performans göstermiştir. Zımpara da yalnızca çakılma bölgesi genişliğinde garnetten daha iyi performans göstermiştir. Sapma açısında ise hemen hemen garnetle aynı değeri vermiştir. Olivin de genel itibarıyla zımparaya benzer değerler vermiştir. Plastik ise sapma açısı ve çakılma bölgesi genişliği haricinde tüm performans kriterleri bakımından garnete göre kötü performans göstermiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ASJ ile çeşitli aşındırıcılar (alüminyum oksit kahverengi, alüminyum oksit beyaz, zımpara tozu, garnet, cam küre, olivin, çelik bilye ve plastik granül) kullanılarak 10 farklı kayacın kesimleri yapılmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle, kayaçların (yoğunluk, su emme kapasitesi, porozite, tek eksenli basma dayanımı, nokta yük dayanımı, indirekt çekme dayanımı, Böhme aşınma kaybı, Schmidt sertlik değerleri ve ultrasonik dalga hızı) ve aşındırıcıların (yoğunluk, sertlik, tane şekli gibi) çeşitli özellikleri belirlenmiştir. Aşındırıcıların performans değerlendirmelerinde; malzeme uzaklaştırma oranı, kesme derinliği (ayrıca kesme-aşınma bölgesi derinliği), kesme genişliği, kerf açısı, çakılma bölgesi, sapma açısı ve yüzey pürüzlülüğü referans alınmıştır. Kesme performans ölçütlerinin kayaç özelliklerine bağlı olarak tahminini sağlayan istatistikî modeller geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir:

- i. Kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve kerf açısı açısından en iyi sonuçların çelik bilye ile elde edildiği tespit edilmiştir. Söz konusu ölçütler temelinde çeliğin ardından en iyi performansı ise alüminyum oksitler göstermiştir. Yüzey kalitesi açısından ise çelik bilyenin en kötü sonuçları verdiği belirlenmiştir.
- ii. Garnetin, yüzey pürüzlülüğünde en iyi sonuçları verdiği ve diğer performans kriterleri açısından orta performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Olivin, cam küre ve zımpara tozunun da genel olarak orta performans sergilediği belirlenmiştir.
- iii. Plastik granül ile etkili bir kesim gerçekleştirilemediği ve sapma açısı haricinde tüm performans kriterleri açısından oldukça kötü sonuçların elde edildiği saptanmıştır. Plastik granülün, ASJ ile kayaç kesmede aşındırıcı olarak kullanılmaya uygun bir malzeme olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- iv. Genel olarak tüm performans göstergeleri açısından en uygun aşındırıcıların alüminyum oksitler olduğu belirlenmiştir.
- v. Aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarıyla kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve sapma açısı arasında doğru, kerf açısı arasında ters orantılı ilişki olduğu saptanmıştır. Bunun yanında, aşındırıcıların sertlik ve yoğunluklarıyla kesme genişliği ve yüzey pürüzlülüğü arasında anlamlı bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir.
- vi. Küresel olan aşındırıcıların köşeli olanlara göre kesme genişliğini ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

- vii. Aşındırıcı özelliklerinden yoğunluğun, sertliğe göre genel olarak kesme performans ölçütleri üzerinde daha etkili olduğu (daha yüksek korelasyonlu ilişkiler verdiği) ortaya konmuştur.
- viii. Kayaç özelliklerinden Böhme aşınma kaybı, porozite ve su emme oranı ile kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü arasında doğru, kerf ve sapma açıları arasında ters orantılı ilişkiler olduğu ortaya konulmuştur. Bu kayaç özelliklerinin aksine; kayaçların yoğunluk, sertlik (Schmidt), dayanım (tek eksenli basma, nokta yük, indirekt çekme) ve ultrasonik dalga hızı değerleri ile kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü arasında ters, kerf ve sapma açıları arasında ise doğru orantılı ilişkiler olduğu tespit edilmiştir.
- ix. Kesme performansı üzerinde en çok etkiye sahip kayaç özelliğinin Böhme aşınma kaybı olduğu belirlenmiştir. Tüm kayaç özelliklerinin en çok etkilediği kesme performansının kesme derinliği olduğu saptanmıştır.
- x. Yüzey pürüzlülüğünün aşındırıcı özelliklerinden ziyade kayaç özelliklerinden etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.
- xi. Kesme genişliği ile kayaç ve aşındırıcı özellikleri (tane şekli dışındaki) arasında anlamlı ilişkiler tespit edilmemiştir.
- xii. Çalışmada genel olarak kesme genişlikleri ve kerf açılarının birbirine yakın ve düşük değerlerde olduğu belirlenmiştir. Diğer performans ölçütleri açısından ise elde edilen değerlerin daha geniş bir aralıkta değiştiği saptanmıştır.
- xiii. Kesme derinliği, malzeme uzaklaştırma oranı, çakılma bölgesi genişliği ve yüzey pürüzlülüğünün (A grubu olarak isimlendirilirse) birbirleriyle doğru orantılı olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, kerf açısı ve sapma açısının (B grubu olarak isimlendirilirse) da birbirleriyle doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Bu iki grubun aralarında ise ters orantılı ilişkiler olduğu saptanmıştır. Kesme genişliğinin ise diğer performans ölçütlerinden pek etkilenmediği belirlenmiştir.
- xiv. Regresyon analizleri ile geliştirilen modeller ile performans çıktılarının etkin bir şekilde tahmin edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- xv. Bu çalışmada denenen aşındırıcılardan plastik granül haricindekileri, arzu edilen sonuç ve amaca göre (en derin, en pürüzsüz yüzeyli, en dik vs. kesim) ASJ ile farklı özelliklerdeki doğal taşların kesilmesi/işlenmesinde kullanılabilir.

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

- i. Bu çalışmada kesme parametreleri (kesme hızı, aşındırıcı besleme miktarı, pompa basıncı, nozül-numune mesafesi) sabit tutulmuştur. Bu parametrelerinin farklı seviyelerinde kesme performanslarının irdelenmesi daha kapsamlı verilerin elde edilmesine olanak sağlayacaktır. Özellikle aşındırıcı besleme miktarı jetin kesme performansı ile doğrudan ilişkilidir. Daha iyi kesme performansının elde edilebilmesi için aşındırıcı yoğunluğunun referans alınarak bu parametrenin belirlenmesi gerekmektedir.
- ii. ASJ yönteminde aşındırıcı olarak kullanılabilme potansiyeli bulunan farklı aşındırıcıların da (sahil kumu, kuvars, bor karbür, zirkonyum silikat vb.) benzer amaçlarda kullanımı denenebilir. Farklı aşındırıcıların kesme performanslarının irdelenmesiyle bu çalışmada önerilen aşındırıcılara alternatif oluşturabilecek aşındırıcılar belirlenebilir. Ayrıca atık nitelikli bazı malzemelerin de (cam, ferrokrom cürufu, bakır cürufu, kuvars, granit, bazalt vb.) bu amaçla kullanılması gerçekleştirilebilir. Böyle malzemelerin kullanımı hem aşındırıcı maliyetinin azaltılması hem de çevresel atıkların bertarafı açısından büyük önem arz etmektedir.
- iii. Bu çalışmada ince-orta taneli kayaçlar kullanılmıştır. Farklı aşındırıcıların performansı, granit gibi iri taneli kayaçların ASJ ile kesiminde de denenebilir. Böylelikle, kesme performansı üzerinde kesilen kayaç numunesinin tane boyutunun etkisi irdelenebilir.
- iv. Aşındırıcı özelliklerinin nozülün ömrü (aşınması) üzerindeki etkileri de araştırılmalıdır. Daha sert aşındırıcıların, nozülün ömrünü daha hızlı tüketeceği göz önünde bulundurulmalıdır.
- v. Bu çalışma kapsamında değerlendirilmeyen aşındırıcı özelliklerinin (tane boyut dağılımı, kırılgenlik vs.) kesme performansı üzerindeki etkileri de irdelenebilir.
- vi. Aşındırıcıların geri dönüştürülmesi adına tekrar kullanılabilme kapasiteleri irdelenmelidir.
- vii. ASJ ile kayaç kesimi sırasında açığa çıkan aşındırıcı-kesilen malzeme parçacıkları ve atık su çevresel etki açısından değerlendirilmelidir.

5. KAYNAKLAR

- Adıgüzel, M. ve Şengüler, M., 2019. Türkiye Mermer Sektörünün ve Rekabet Gücünün İncelenmesi, Üçüncü Sektör Sosyal Ekonomi Dergisi, 54, 3, 1530-1546.
- Agus, M., Bartolussi, A., Ciccu, R., Imolesi, E. ve Vargiu, A., 1995. Stone Cutting with Diajet, DIGITA, Dipartimento di Geoingegneria e Tecnologie Ambientali- Centro Studi Geominerari e Mineralurgici del CNR Università degli Studi di Cagliari, Italy.
- Agus, M., Bartolussi, A., Ciccu, R., Kim, W., M. ve Manca, P., P., 1993. The Influence of Rock Properties on Waterjet Performance, Proceedings of 7th American Water jet Conference, Seattle, Washington, 427-442.
- Akkurt, A., 2002. Çeşitli Malzemelerin Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesilmesinde Yüzey Özellikleri, Sertlik ve Mikroyapı Değişimlerinin Farklı Kesme Yöntemleriyle Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Akkurt, A., 2004. Su Jeti ile Kesme Sistemleri ve Uygulama Alanlarının Değerlendirilmesi, Politeknik, 7, 2, 129-139.
- Aksu, A., 2012. AlMg3/SiCp Kompozit Malzemelerin Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesilmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Alsoufi, S., M., Suker, K., D., Alhazmi, W., M. ve 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, 25-37.
- Ansari, I., A. ve Hashish, M., 1995. Effect of Abrasive Waterjet Parameters on Volume Removal Trends in Turning, Journal of Engineering For Industry, 475-484.
- Arab, P., B. ve Celestino, T., B., 2017. Influence of Traverse Velocity and Pump Pressure on the Efficiency of Abrasive Waterjet for Rock Cutting, Soils and Rocks, 40, 3, 255-262.
- Arıkan, M., 1968. Mermer ve Mermercilik, Ankara Basım ve Ciltevi, 187 s.
- Arola, D. ve Ramulu, M., 1993. Mechanism of Material Removal in Abrasive Waterjet Machining of Common Aerospace Materials, Proceedings of 7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington, 43-64.
- ASTM, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, D854-14, ASTM International, West Conschohocken, PA.

- Axinte, D., A., Srinivasu, D., S., Kong, M., C. ve Butler-Smith, P., W., 2009. Abrasive Waterjet Cutting of Polycrystalline Diamond: A Preliminary Investigation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 797-803.
- Aydın, A., 2014. Upgraded ISRM Suggested Method for Determining Sound Velocity by Ultrasonic Pulse Transmission Technique, Rock. Mech. Rock. Eng., 47, 255–259.
- Aydın, G., 2012. Kesici Disklerin Kayaç Kesme Performansının Araştırılması ve Performans Tahminine Yönelik Modellerin Geliştirilmesi Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Aydın, G., 2014. Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Cutting with Different Types of Granite, Arabian Journal of Geosciences, 7, 10, 4425–4435.
- Aydın, G., 2015. Performance of Recycling Abrasives in Rock Cutting by Abrasive Water Jet, Journal of Central South University, 22, 3, 1055-1061.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2010. Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Çalışma Parametrelerinin Granit Kerf Açısına Etkisinin Araştırılması, Madencilik, 49, 2, 17-26.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2011. An Investigation on the Surface Roughness of the Granite Machined by Abrasive Waterjet, Bulletin of Materials Science, 34, 4, 985-992.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2012. Performance of Abrasive Waterjet in Granite Cutting: Influence of the Textural Properties, Journal of Materials in Civil Engineering, 24, 7, 944–949.
- Aydın, G., Karakurt, İ. ve Aydın, K., 2013. Prediction of Cut Depth of the Granitic Rocks Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), Rock. Mech. Rock. Eng., 46, 5, 1223–1235.
- Aydın, G., Kaya, S. ve Karakurt, İ., 2015. Modeling of Energy Consumption Based on Population: The Case of Turkey, 24th International Mining Congress of Turkey, IMCET, Nisan, Antalya, Türkiye, 88-92.
- Aydın, G., Kaya, S. ve Karakurt, İ., 2017. Utilization of Solid-Cutting Waste of Granite as an Alternative Abrasive in Abrasive Waterjet Cutting of Marble, J. Clean. Prod., 159, 241–247.
- Aydın, G., Kaya, S. ve Karakurt, İ., 2019. Effect of Abrasive Type on Marble Cutting Performance of Abrasive Waterjet, Arabian J. Geosci., 12, 11.
- Babu, M., K. ve Chetty O., V., K., 2003. A Study on Recycling of Abrasives in Abrasive Water Jet Machining, Wear, 254, 7-8, 763-773.

- Babu, M., K. ve Krishnaiah, O., V., 2003. Studies on Abrasive Waterjet Machining of Black Granite Through Design of Experiments, Experimental Techniques, September/October 2003, 49-54.
- Baxter, E., F., Caddick, M., J. ve Ague, J., J., 2013. Garnet: Common Mineral, Uncommonly Useful, Elements, 9, 6, 415–419.
- Bishop, M., 2009. Reusing Waterjet Cutting Abrasive, The Fabricator, 9,7, 36-40.
- Bland, J., M. ve Altman, D., G., 1996. Statistics Notes: Measurement Error, BMJ, 312, 7047, 1654.
- Blickwedel, H., 1990. Erzeugung und Wirkung von Hochdruck-Abrasivstrahlen, VDI Fortschritt-Berichte, 2, 206.
- Cha, Y, Oh, T.-M. ve Cho, G.-C., 2019. Waterjet Erosion Model for Rock-Like Material Considering Properties of Abrasive and Target Materials, Appl. Sci., 9, 4234.
- Cha, Y, Oh, T.-M., Joo, G.-W. ve Cho, G.-C., 2021. Performance and Reuse of Steel Shot in Abrasive Waterjet Cutting of Granite, Rock. Mech. Rock. Eng., 54, 1551-1563.
- Chadwick, R., Corriveau, J. ve Kurko, M, 1973. Nozzle for Producing Fluid Cutting Jet (Patent), US3756106 A.
- Chakraborty, S. ve Mitra, A., 2018. Parametric Optimization of Abrasive Water-jet Machining Processes Using Grey Wolf Optimizer, Materials and Manufacturing Processes, 33, 13, 1471-1482.
- Chao, J., Zhou, G., Leu, M.C., 1995. Characteristics of Abrasive Waterjet Generated Surfaces and Effects of Cutting Parameters and Structure Vibration, Journal of Engineering for Industry, 117, 516-525.
- Chau, K., T. ve Wong, R., H., C. 1996. Uniaxial Compressive Strength and Point Load Strength of Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 33, 2, 183-188.
- Chen, F., L. ve Siores, E., 2001. The Effect of Cutting Jet Variation on Striation Formation in Abrasive Water Jet Cutting, Int. J. Mach. Tools Manuf., 41, 1479-1486.
- Coşansu, G., 2010. Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesmede Kolemanit Tozunun Aşındırıcı Olarak Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Coşansu, G. ve Çoğun, 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.

- Çandar, H., 2012. Experimental Study on Optimization of Cutting Parameters in Abrasive Waterjet Machine, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Çetin, B., 2021. Parameter Selection Approach and Optimization in Abrasive Water Jet Machining, Doktora Tezi, Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- Dahil, İ., 2008. İleri Kesim Tekniklerinin Karşılaştırılması ve Kesilen Metal Malzemenin Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- DIN EN ISO, 2010. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Terms, Definitions and Surface Texture Parameters, 4287, 2010-07, DIN German National Standard, Berlin, Germany.
- Eleren, A. ve Ersoy, M., 2007. Mermer Blok Kesim Yöntemlerinin Bulanık Topsis Yöntemiyle Değerlendirilmesi, Madencilik, 46, 3, 9-22.
- Eleren, A. ve Ersoy, M., 2011. Mermer Ocaklarında Elmas Tel ve Kollu Kesiciyle Kesme Teknolojilerinin İş Güvenliği Bakımından Karşılaştırılmasında Hata Türü Etki Analizi Yönteminin Uygulanması, Tübav Bilim Dergisi, 4, 1, 9-19.
- EN 14157, 2017. Natural Stone Test Methods – Determination of the Abrasion Resistance, CEN European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Engin, İ., C., 2006. Bazı Türk Mermerlerinin Aşındırıcılı Su Demeti ile Kesilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Engin, İ., C., 2012. A Correlation for Predicting the Abrasive Water Jet Cutting Depth for Natural Stones, S. Afr. J. Sci., 108, 9/10, 1–11.
- Engin, İ., C., Bayram, F. ve Yasitli, N., E., 2013. Experimental and Statistical Evaluation of Cutting Methods in Relation to Specific Energy and Rock Properties, Rock. Mech. Rock. Eng., 46, 755-766.
- Engin, İ., C., Özkan, E. ve Kulaksız, S., 2011. Investigation on the Usage of Some Non-Almandine Garnet Minerals as Abrasive Material in Waterjet Cutting, G.U. J. Sci., 24, 3, 535-545.
- Ergür, H. S., 2007. Aşındırıcı Su Jetinin Teorik Analizi ve Yapay Sinir Ağı Yöntemiyle Modellenmesi, Doktora Tezi, ESOĞÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ersöz, M., İ., 2014. Katrak Makinelerinde Kullanılan Elmas Soketlerin Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

- Fener, M., Kahraman, S., Bilgil, A. ve Günaydın, O., 2005. A Comparative Evaluation of Indirect Methods to Estimate the Compressive Strength of Rocks, Rock Mech. Rock Eng., 38, 4, 329–343.
- Fourness, C., A. ve Pearson, C., M, 1935. Paper Metering, Cutting, and Reeling (Patent), US2006499 A.
- Fowler G., Pashby I., R. ve Shipway, P., H., 2009. The Effect of Particle Hardness and Shape When Abrasive Water Jet Milling Titanium Alloy Ti6Al4V, Wear, 266, 613–620.
- Franz, N., C., 1971. High Velocity Liquid Jet (Patent), US3524367 A.
- Galoisy, L., 2013. Garnet: From Stone to Star, Elements, 9, 6, 453–456.
- Göktan, R.M ve Yılmaz, N.G., 2006. Mermer Üretim ve İşleme Teknikleri, Eskişehir Osmangazi Üni. Müh. Fak. Maden Müh. Bölümü, Eskişehir, 127 s.
- Guo, J., Louis, N., S., Meier, H. ve Ohlsen, G., 1993. Abrasive Water Jet Cutting Methods to Calculate Cutting Performance and Cutting Efficiency, Ed. Geomech., 93, 291–299.
- Gupta, V., Garg, P., M, Batra, K., M. ve 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.
- Gupta, V., Pandey, P., M., Garg, M., P., Khanna, R. ve Batra, N., K., 2014. Minimization of Kerf Taper Angle and Kerf Width Using Taguchi's Method in Abrasive Water Jet Machining of Marble, Procedia Mater. Sci., 6, 140–149.
- Hallaçoğlu, İ., 1999. Aşındırıcılar, 1. Baskı, Kastaş Yayınevi, İstanbul, 624 s.
- Hasçalık, A., 2007. Materials & Design Effect of Traverse Speed on Abrasive Waterjet Machining, Materials & Design, 28, 1953–1957.
- Hashish, M., 1988. Visualization of the of the Abrasive Waterjet Cutting Process, J. Exp. Mech., 28, 2, 159–169.
- Hashish, M., 1989. Pressure Effects in Abrasive-waterjet (AWJ) Machining, J. Eng. Mater. Technol., 111, 221–228.
- Hashish, M., 1991. Characteristics of Surfaces Machined with Abrasive-waterjets, J. Eng. Mater. Technol., 113, 3, 354–362.
- Hashish, M., Kirby., M. ve Pao, Y.H., 1987. Method and Apparatus for Forming a High Velocity Liquid Abrasive Jet (Patent), US4648215 A.
- Himmelreich, U., 1992. Fluidodynamische Modelluntersuchungen an Wasserabrasivstrahlen, VDI Fortschritt-Berichte, 7, 219.

- Hlavac, L., M., Hlavacova, I., M., Gembalova, L., Kalicinsky, J. ve Fabian, S., 2009. Experimental Method for the Investigation of the Abrasive Water Jet Cutting Quality, J. Mater. Process. Technol., 209, 20, 6190–6195.
- Hlavac, L., M., Hlavacova, I., M. ve Geryk, V., 2017. Taper of Kerfs Made in Rocks by Abrasive Water Jet (AWJ), Int. J. Adv. Manuf. Technol., 88, 443–449.
- Hlavacova, I., M. ve Geryk, V., 2017. Abrasives for Waterjet Cutting of High-strength and Thick Hard Materials, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 90, 1217-1224.
- Huang, Z., C., Hou, G., R., Wang, J. ve Feng, X., Y., 2006. The Effect of High-pressure Abrasive Water Jet Cutting Parameters on Cutting Performance of Granite, Key Eng. Mater., 304-305, 560–564.
- Iqbal, A., Dar, N., U. ve Hussain, G., 2011. Optimization of Abrasive Water Jet Cutting of Ductile Materials, J. Wuhan Univ. Technol. Mater. Sci. Ed., 26, 1, 88–92.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006 (Ed: Ulusay, R. ve Hudson, J.A.), Kozan Ofset, Ankara, 628 s.
- İnal, S., 2011. Aşındırıcı Katkılı Su Jeti ile Kesmede Çalışma Parametreleri ve Kayaç Özelliklerinin Kesme Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karahan, D., S., 2018. Dünyada ve Türkiye’de Doğal Taşlar, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, 37s.
- Karakurt, İ., 2007. Aşındırıcı Su Jeti Kesme Sistemlerinin Kayaç Kesme Performanslarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karakurt, İ., 2011. Aşındırıcı Su Jeti (ASJ) ile Kayaç Kesmede Parametrik Değişimlerin ve Malzeme Dokusal Özelliklerinin Kesme Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2010 (a). Aşındırıcılı Su Jeti ile Kesmede Kesme Parametrelerinin Granit Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi, Yerbilimleri, 31, 2, 99-110.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2010 (b). Su Jeti Teknolojisinin Madencilik Sektöründeki Uygulamalarının Değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 1, 105-112.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2011 (a). Analysis of the Kerf Angle of the Granite Machined by Abrasive Waterjet (AWJ), Indian Journal of Engineering and Material Sciences, 18, 6, 435-442.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2011 (b). Effect of the Uniaxial Compressive Strength of the Rock on the Cutting Performance of AWJ, American Waterjet

Conference and Expo 2011, Houston, Amerika Birleşik Devletleri, 25-29 Temmuz.

- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2012 (a). A Study on the Prediction of Kerf Angle in Abrasive Waterjet Machining of Rocks, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226, 1489-1499.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2012 (b). An Experimental Study on the Cut Depth of the Granite in Abrasive Waterjet Cutting, *Materials and Manufacturing Processes*, 27, 5, 538-544.
- Karakurt, İ., Aydın, G. ve Aydın, K., 2014. An Investigation on the Kerf Width in Abrasive Waterjet Cutting of Granitic Rocks, *Arabian Journal of Geosciences*, 7, 7, 2923-2932.
- Kartal, F., 2015. AISI 105 Çeliğinin Aşındırıcı Su Jeti ile Tornalanmasında Farklı Parametrelerin Talaş Kaldırma Oranı ve Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- Kaya, S., 2016. Su Jetiyle Kayaç Kesmede Çeşitli Aşındırıcıların Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Khan, A., A. ve Haque, M., M., 2007. Performance of Different Abrasive Materials During Abrasive Water Jet Machining of Glass, *J. Mater. Process. Technol.*, 191, 404-407.
- Kohno, M. ve Maeda, H., 2018. Estimate of Uniaxial Compressive Strength of Hydrothermally Altered Soft Rocks Based on Strength Index Tests, *Geomaterials*, 8, 2, 15-25.
- Kulaksız, S. (Ed.), 2012. Doğal Taş (Mermer) Maden İşletmeciliği ve İşleme Teknolojileri, 3. Baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 636 s.
- Leach, S.J. ve Walker, G.L., 1966. The Application of High-Speed Liquid Jets to Cutting, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 260, 1110, 295-310.
- Lebar, A. ve Junkar, M., 2004. Simulation of Abrasive Water Jet Cutting Process: Part 1, Unit Event Approach, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 12, 1159- 1170.
- Lewis, C., D., 1982. International and Business Forecasting Methods, Butterworth-Heinemann, London, 143 s.
- Liu, H., 2004. A Study of the Cutting Performance in Abrasive Waterjet Contouring of Alumina Ceramics and Associated Jet Dynamic Characteristics, PhD. Thesis,

School of Mechanical, Manufacturing and Medical Engineering, Queensland University of Technology, Australia.

- Long, X., Ruan, X., Liua, Q., Chen, Z., Xue, S. ve Wu, Z., 2017. Numerical Investigation on the Internal Flow and the Particle Movement in the Abrasive Waterjet Nozzle, Powder Tech., 314, 635–640.
- Madara, S., R., Seval, C., P. ve Pillai, S., R., 2019. Impact of Process Parameters on Surface Roughness of Hastelloy Using Abrasive Waterjet Machining Technology, Int. J. Recent Technol. Eng., 7, 5, 2.
- Maros, Z., 2012. Taper of Cut at Abrasive Waterjet Cutting of an Aluminum Alloy, Production Processes and Systems, 5, 1, 55-60.
- Martinec, P., 1992. Mineralogical Properties of Abrasive Materials and Their Role in Water Jet Cutting Process, Geomechanics, 91, 353-382.
- Młynarczyk, M., Skiba, M., Sitek, L., Hlavac, P., Hlavacek, P. ve Kozusnikova, A., 2014. The Research into the Quality of Rock Surfaces Obtained by Abrasive Water Jet Cutting, Archives of Mining Sciences, 59, 4, 925–940.
- Miranda, M., R., Lousa, P., Miranda, M., J., A. ve Kim, T., 1993. Abrasive Waterjet Cutting of Portuguese Marbles, Proceedings of 7th American Water Jet Conference, Seattle, Washington, 443–457.
- Miranda, M., R. ve Quintino, L., 2005. Microstructural Study of Material Removal Mechanisms Observed in Abrasive Waterjet Cutting of Calcareous Stones, Materials Characterization, 54, 370-377.
- Momber, A., W., 1998. The Kinetic Energy of Wear Particles Generated by Abrasive-waterjet Erosion, Journal of Materials Processing Technology, 83, 1-3, 121-126.
- Momber, A., W., 2001. Energy Transfer During the Mixing of Air and Solid Particles into a High-speed Waterjet: an Impact-force Study, Experimental Thermal and Fluid Science, 25, 31-41.
- Momber, A., W. ve Kovacevic, R., 1997. Test Parameter Analysis in Abrasive Water Jet Cutting of Rocklike Materials, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 34, 1, 17-25.
- Momber, A., W. ve Kovacevic, R., 1998. Principles of Abrasive Water Jet Machining, 1st Edition, Springer-Verlag London Limited, 394 s.
- Montgomery, D., C., Peck, E., A. ve Vining, G., G., 2013. Doğrusal Regresyon Analizine Giriş (Ed. Erar, M., A.), 5. Basımdan Çeviri, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, 645 s.
- Muthuramalingam, T., Vasanth, S., Vinothkumar, P., Geethapriyan, T. ve Rabik, M., M., 2018. Multi Criteria Decision Making of Abrasive Flow Oriented Process

Parameters in Abrasive Water Jet Machining Using Taguchi–DEAR Methodology, Silicon, 10, 5, 2015–2021.

- Nagdeve, L., Chaturvedi, V. ve Vimal, J., 2012. Parametric Optimization of Abrasive Water Jet Machining Using Taguchi Methodology, Int. J. Res. Eng. Appl. Sci., 2, 6, 23-32.
- Oh, T.-M. ve Cho, G.-C., 2014. Characterization of Effective Parameters in Abrasive Waterjet Rock Cutting, Rock. Mech. Rock. Eng., 47, 745-756.
- Oh, T.-M. ve Cho, G.-C., 2016. Rock Cutting Depth Model Based on Kinetic Energy of Abrasive Waterjet, Rock. Mech. Rock. Eng., 49, 1059-1072.
- Onargan, T., Köse, H. ve Deliormanlı, A.H., 2006. Mermer, 4. Baskı, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 324 s.
- Özçelik, Y., Polat, E., Bayram, F. ve Ay, A., M., 2004. Investigation of the Effects of Textural Properties on Marble Cutting with Diamond Wire, Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., 41, 3, 1-7.
- Panchal, K., D. ve Shaikh, A., H., 2021. Performance Analysis and Process Parameters Optimization on Specific Cutting Energy in the Abrasive Waterjet Cutting, Int. J. Ambient Energy, 1-8.
- Pearson, K., 1895. Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents, Proceedings of the Royal Society of London, 58, 240-242.
- Perec, A., 2017. Disintegration and Recycling Possibility of Selected Abrasives for Water Jet Cutting, DYNA, 84, 203, 249–256.
- Perec, A., Pude, F., Grigoryev, A., Kaufeld, M. ve Wegener, K., 2017. Obtaining the Selected Surface Roughness by Means of Mathematical Model Based Parameter Optimization in Abrasive Waterjet Cutting, Stroj. Vestnik/Journal Mech. Eng., 63, 10, 606–613.
- Perec, A., Pude, F., Grigoryev, A., Kaufeld, M. ve Wegener, K., 2019. A Study of Wear on Focusing Tubes Exposed to Corundum-based Abrasives in the Waterjet Cutting Process, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 104, 2415-2427.
- Pi, V. N., 2008. Performance Enhancement of Abrasive Waterjet Cutting, Master of Engineering, Hanoi University of Technology, Vietnam.
- Radovanovic, M., 2020. Multi-Objective Optimization of Abrasive Water Jet Cutting Using MOGA, Procedia Manufacturing, 47, 781-787.
- Raju, P. ve Ramulu, M., 1994. Predicting Hydro-abrasive Erosive Wear During Abrasive Waterjet Cutting: Part I - A Mechanistic Formulation and its Solution, Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November, Chicago, Illinois, 339–351.

- Ramulu, M., 1997. Machining and Surface Integrity of Fiber-Reinforced Plastic Composites, Sadhana, 449-472.
- Ranney Jr, W., A., 1995. Waterjet Abrasives: Evaluating Cost Analysis Procedures, Proceedings of the 8th US Water Jet Conference, Water Jet Technology Association, St. Louis, 727– 734.
- Rice, P.K., 1965. Process for Cutting and Working Solid Materials (Patent), US3212378A.
- Saraçyakupoğlu, T., 2012. Aşındırıcı Su Jeti ile Kesmede Malzeme, Basınç, İlerleme Hızı ve Su Jeti Çapının Yüzey Kalitesine Etkisinin Analizi, Doktora Tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Saravanan, S., Vijayan, V., Suthahar, S., T., J., Balan, A., V., Sankar, S. ve Ravichandran, M., 2020. A Review on Recent Progresses in Machining Methods Based on Abrasive Water Jet Machining, Materials Today: Proceedings, 21, 116-122.
- Schmetzer, K. ve Bernhardt, H., J., 1999. Garnets from Madagascar with a Color Change from Blue-Green to Purple, Gems & Gemology, 35, 4, 96–201.
- Schwacha, B., G., 1961. Liquid Cutting of Hard Materials (Patent), US2985050 A.
- Silvente, A., I., N., Ortega, E., V., Garcia, I., O., Guil, L., M., Gil, J. ve Guerra, A., J., 2020. Influence of the Titanium Implant Surface Treatment on the Surface Roughness and Chemical Composition, Materials, 13, 2, 314.
- Summers, D., A., 1995. Waterjetting Technology, First Edition, E & FN Spon, London, UK, 882 s.
- Tazibt, A., Parsy, F. ve Abriak, N., 1995. Theoretical Analysis of the Particle Acceleration Process in Abrasive Water Jet Cutting, Computational Materials Science, 5, 243-254.
- T.C. Resmî Gazete, 1985. 6727 Sayılı Maden Kanunu, Başbakanlık Basımevi, 18785, 5, 24, 446.
- T.C. Ticaret Bakanlığı, 2021. Doğal Taşlar Sektör Raporu, İhracat Genel Müdürlüğü Maden, Metal ve Orman Ürünleri Dairesi, Ankara.
- Tikhomirov, R., A., Babanin, V., F., Petukhov E., N., Starikov, I., D. ve Kovalev V., A., 1992. High-Pressure Jetcutting, ASME press, New York.
- Tirrell, L., L., 1939. Sandblast Device (Patent), US 2176577 A.
- URL-1, <https://www.deltamarble.com/marble-from-past-to-present/>. 16 Mart 2022.
- URL-2, https://www.scmgroup.com/en_US/cmsstone/news-events/news/a-look-at-stone-cutting-through-the-years.n68617.html. 16 Mart 2022.

- URL-3, <https://zolfagharstone.com/en-us/blog/view/articleid/1269/stone-cutting>. 16 Mart 2022.
- URL-4, <https://www.theengineerspost.com/unconventional-machining/>. 18 Mart 2022.
- URL-5, <https://www.machinemfg.com/non-traditional-machining/>. 18 Mart 2022.
- URL-6, <https://www.icscuts.com/blog/press/the-history-of-waterjet-cutting>. 21 Mart 2022.
- URL-7, <https://mavijet.com.tr/3-eksen-cnc-su-jeti?dil=tr>. 21 Mart 2022.
- URL-8, <https://www.academia.edu/5395280/wrap-fn>. 22 Mart 2022.
- URL-9, <https://www.stonecontact.com>. 22 Mart 2022.
- URL-10, <https://www.kuhmichel.com/en/>. 28 Mart 2022.
- URL-11, <https://www.iski.istanbul/web/tr-TR/su-kalite-raporlari>.
- URL-12, https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/803/mod_resource/content/3/Basit%20Do%C4%9Frusal%20Regresyonda%20Hipotez%20Testi%20ve%20G%C3%BCven%20Aral%C4%B1%C4%9F%C4%B1.pdf. 25 Mayıs 2022.
- URL-13, <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/standard-deviation/>. 25 Temmuz 2022.
- Ünal, M. ve Altınok, E., 2019. Determination of Water Absorption Properties of Natural Building Stones and Their Relation to Porosity. Eng. Sci. (NWSAENS), 14, 1, 39-45.
- Valicek, J., Hloch, S., Kozak, D., Tozan, H. ve Yagimli, M., 2011. Surfaces Created by Abrasive Waterjet, 1. Baskı, Beta Basım A. Ş., İstanbul, 196 s.
- Valicek, J., Madr, V., Drizik, M., Hloch, S., Radvanska, A., Ohlidal, M. ve Miloslav, L., 2007. An Investigation of Surfaces Generated by Abrasive Waterjets Using Optical Detection, Strojnicki Vestnik – Journal of Mechanical Engineering, 53, 4, 224-232.
- Vie, G., G., 1983. Cutting Hard Rock with Abrasive-entrained Waterjet at Moderate Pressures, Proceedings of the Second US Water Jet Conference, Water Jet Technology Association, Missouri, 437– 454.
- Wang, J., 2007. Predictive Depth of Jet Penetration Models for Abrasive Waterjet Cutting of Alumina Ceramics”, International Journal of Mechanical Sciences, 306-316.

- Wang, J., Guo, D., M., 2003. The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics, Journal of Materials Processing Technology, 133, 371-377.
- Wang, S., Yang, F., Hu, D., Tang, C. ve Lin, P., 2021. Modelling and Analysis of Abrasive Water Jet Cutting Front Profile, Int. J. Adv. Manu. Tech., 114, 2829-2837.
- Xiao, S., Ren, Q., Cheng, Y., Zhao, H., Cao, S., Zhang, L., Chen, B. ve Meng, X., 2021. Damage and Fracture Characteristics of Rocks with Different Structures Under High-velocity Water Jet Impact, Engineering Fracture Mechanics, 256, 107961.
- Xu, S., 2005. Modelling the Cutting Process and Cutting Performance in Abrasive Waterjet Machining with Controlled Nozzle Oscillation, Doktora Tezi, School of Engineering Systems Queensland University of Technology, Australia.
- Zain, A., M., Haron, H. ve Sharif, S., 2011. Optimization of Process Parameters in the Abrasive Waterjet Machining Using Integrated SA-GA, Appl. Soft Comput. J., 11, 8, 5350–5359.

6. EKLER



Ek Tablo 1. Kesim yüzeylerinden 2 cm aralıklarla ölçülen tüm kesme derinliği (h_t) değerleri

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta	KESME DERİNLİKLERİ (h_t)									
		Kayaç									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Garnet	1	37,67	38,87	52,12	43,80	31,90	97,15	71,51	80,16	82,58	100,44
	2	38,07	40,05	54,51	43,83	31,14	87,99	71,53	85,00	84,12	112,69
	3	37,88	39,39	50,02	45,21	31,12	91,50	68,52	88,33	81,02	111,08
	4	38,24	39,88	48,77	41,57	32,58	96,52	72,55	80,97	80,77	98,22
	5	37,11	39,86	49,12	44,62	32,77	95,99	71,77	81,40	80,76	102,97
	6	38,10	37,63	48,54	44,72	30,88	94,05	73,12	81,67	81,78	103,58
	7	38,31	39,88	48,21	42,46	32,42	93,93	68,45	81,50	81,31	101,88
	8	38,30	38,01	49,65	42,88	30,77	90,82	71,88	79,87	81,98	106,23
	9	37,95	39,50	50,20	43,12	31,98	90,42	72,10	77,04	81,00	109,95
	Ort.	37,96	39,23	50,13	43,58	31,73	93,15	71,27	81,77	81,70	105,23
AOB	1	48,25	42,86	48,72	46,04	56,31	100,90	84,92	100,20	101,99	116,50
	2	48,06	42,87	47,58	43,93	60,53	95,54	90,87	100,19	100,85	114,42
	3	49,42	39,42	45,67	52,76	62,34	99,92	95,33	99,17	101,59	115,80
	4	51,08	39,13	48,74	53,62	60,27	100,00	89,95	94,08	101,74	121,99
	5	47,72	41,41	49,88	50,82	61,11	86,36	90,33	95,81	102,56	122,25
	6	51,74	41,33	47,01	47,59	61,07	98,14	98,63	97,38	102,67	120,59
	7	51,86	37,73	49,18	46,67	59,67	97,67	92,33	94,62	102,53	114,30
	8	51,21	38,95	52,21	46,00	57,80	88,03	93,91	99,00	100,87	117,14
	9	54,87	39,88	50,10	51,44	56,35	94,54	97,64	95,20	101,54	117,18
	Ort.	48,25	42,86	48,79	48,76	59,49	95,68	92,66	97,29	101,82	117,80
AOK	1	48,49	46,75	50,77	45,61	52,80	94,27	79,07	92,15	96,73	101,22
	2	48,37	49,88	50,28	45,62	54,54	84,95	79,13	90,25	97,97	108,47
	3	50,01	51,87	50,76	45,11	51,77	83,50	79,09	90,02	97,82	115,35
	4	51,57	52,15	51,57	45,12	52,65	90,69	79,46	90,78	97,79	105,51
	5	47,19	51,45	51,00	45,12	54,12	91,66	77,45	89,54	98,26	101,27
	6	51,19	50,78	51,43	45,02	54,20	84,68	76,11	90,25	98,26	111,87
	7	48,62	53,45	50,00	45,33	54,88	88,61	74,12	91,12	98,82	103,20
	8	48,81	49,88	49,58	46,08	52,12	88,62	78,52	92,10	98,84	105,61
	9	50,15	50,12	51,62	45,14	51,77	88,03	79,54	90,12	98,85	105,98
	Ort.	49,38	50,70	50,78	45,35	53,21	88,33	78,05	90,70	98,15	106,50
Cam	1	33,71	25,51	32,30	29,85	35,48	70,89	60,05	60,45	64,89	79,45
	2	33,70	27,00	32,33	30,37	36,25	72,97	61,27	60,25	65,82	80,21
	3	33,52	26,83	32,74	30,88	35,87	73,59	59,98	60,97	66,01	82,55
	4	33,47	26,84	32,51	32,41	36,12	69,18	60,54	60,58	65,04	81,77
	5	33,52	27,31	30,63	32,44	35,25	70,66	60,12	61,12	65,12	79,52
	6	33,78	26,70	28,19	32,59	35,14	74,84	60,87	59,87	64,58	78,88
	7	33,65	27,82	27,92	33,77	35,87	80,10	60,15	59,12	64,88	79,66
	8	33,78	28,13	27,91	33,78	34,89	78,16	58,87	61,20	64,12	78,88
	9	34,56	28,47	28,16	33,77	37,15	78,22	60,20	61,45	64,23	79,12
	Ort.	33,74	27,18	30,30	32,21	35,78	74,29	60,23	60,56	64,97	80,00

Ek Tablo 1'in devamı

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta	KESME DERİNLİKLERİ (h _c)									
		Kayac									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Olivin	1	21,16	21,60	28,74	22,55	29,69	59,94	53,31	57,08	58,96	70,68
	2	20,93	19,23	26,57	23,08	31,07	60,61	52,47	61,83	59,83	70,17
	3	22,01	19,67	26,20	25,03	30,93	60,47	52,30	60,14	60,03	69,91
	4	21,59	21,70	27,06	25,02	28,86	60,19	52,38	57,94	61,54	70,56
	5	22,23	21,23	27,05	25,12	28,32	60,34	52,36	63,83	61,86	71,40
	6	23,80	21,25	27,16	24,02	26,97	53,69	51,81	55,57	61,86	71,34
	7	24,81	21,68	26,77	24,21	26,74	60,81	51,71	55,60	61,88	71,35
	8	24,05	22,80	26,65	24,15	26,73	58,03	51,69	57,28	61,69	71,88
	9	26,52	20,81	26,61	21,07	27,07	53,03	51,60	57,65	61,72	72,14
	Ort.	23,01	21,11	26,98	23,81	28,49	58,57	52,18	58,55	61,04	71,05
Zimpara	1	28,81	29,17	38,02	28,70	30,31	48,90	45,90	50,80	56,45	70,93
	2	28,82	28,84	30,50	28,86	32,15	49,10	46,93	50,88	56,54	70,91
	3	28,91	28,83	30,69	28,99	30,48	49,41	45,58	52,38	56,58	70,33
	4	28,92	30,32	29,50	27,65	29,65	49,40	49,26	56,05	57,33	69,95
	5	28,90	30,38	31,43	27,72	25,84	49,86	51,48	53,01	57,31	69,96
	6	28,00	30,48	31,26	27,71	25,47	49,92	52,38	55,78	57,32	69,95
	7	27,96	30,55	30,75	25,46	26,22	50,12	51,13	56,45	57,10	66,59
	8	29,25	30,51	31,38	28,99	26,71	50,16	53,19	60,30	56,80	65,96
	9	29,75	29,68	31,66	28,62	29,19	50,21	51,66	58,67	56,29	69,42
	Ort.	28,81	29,86	31,69	28,08	28,45	49,68	49,72	54,92	56,86	69,33
Çelik	1	56,72	58,77	52,10	58,78	46,78	129,90	99,78	93,35	90,84	121,42
	2	57,12	62,55	60,18	58,88	49,77	129,70	95,42	94,47	101,19	121,32
	3	55,44	55,44	55,77	57,42	48,85	119,56	97,76	91,18	100,60	121,13
	4	55,88	55,45	58,55	56,12	50,88	125,51	97,75	92,25	100,56	121,11
	5	56,25	54,77	60,04	56,29	48,12	116,80	99,95	92,88	100,74	121,11
	6	56,88	57,80	58,77	56,01	49,88	120,90	98,14	92,45	100,75	121,14
	7	55,20	58,14	55,65	56,58	47,55	132,82	98,46	92,02	100,73	121,11
	8	55,45	55,40	59,12	57,40	48,20	129,19	98,39	92,45	100,68	120,47
	9	55,10	54,71	57,77	58,12	48,99	129,10	98,99	92,04	100,69	122,01
	Ort.	56,00	57,00	57,55	57,29	48,78	125,94	98,29	92,57	99,64	121,20
Plastik	1	6,02	4,57	5,54	5,20	7,82	20,79	16,55	17,88	23,46	30,17
	2	5,95	5,02	5,60	5,62	7,65	20,83	16,34	17,90	23,29	30,01
	3	6,23	5,51	5,68	5,09	7,98	20,06	16,22	17,91	23,60	31,26
	4	6,12	4,89	5,20	5,64	7,01	18,82	16,07	18,87	23,43	30,07
	5	6,02	4,97	5,93	5,55	7,54	19,65	16,07	18,18	22,81	31,79
	6	5,95	4,25	5,55	5,02	7,62	19,29	16,18	17,57	21,54	31,83
	7	5,88	5,32	5,93	5,08	7,88	18,39	16,50	17,56	21,42	32,05
	8	5,23	5,56	5,27	5,10	7,85	17,91	16,25	17,10	20,15	33,09
	9	5,12	4,90	5,38	5,00	7,13	17,11	16,85	17,67	20,15	33,53
	Ort.	5,84	5,00	5,56	5,26	7,61	19,21	16,34	17,85	22,21	31,53

Ek Tablo 2. Kesim yüzeylerinden 2 cm aralıklarla ölçülen tüm kesme-aşınma derinliği (h_a) değerleri

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta No.	KESME-AŞINMA DERİNLİKLERİ (h _a)									
		Kayaç									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Garnet	1	12,66	17,44	21,18	16,53	8,30	33,25	25,31	29,38	30,10	39,17
	2	10,53	17,58	24,52	14,85	8,89	34,90	25,85	28,49	31,75	35,94
	3	11,00	16,35	20,77	14,85	9,11	30,57	23,58	28,59	27,33	37,56
	4	11,04	19,01	22,40	15,67	8,84	24,37	23,37	30,18	27,24	36,84
	5	11,42	18,25	21,55	15,60	8,68	30,75	23,75	29,91	27,94	38,42
	6	11,10	16,97	20,87	15,39	10,41	30,57	26,76	28,48	28,35	35,13
	7	10,94	16,20	19,52	16,55	9,26	30,59	26,73	28,42	31,53	38,08
	8	11,18	16,01	19,22	17,48	11,80	26,81	26,48	28,02	30,48	38,67
	9	12,39	15,77	19,50	16,70	11,05	28,94	25,80	30,79	30,77	39,40
	Ortalama	11,36	17,06	21,06	15,96	9,59	30,08	25,29	29,14	29,50	37,69
AOB	1	18,30	26,91	19,73	23,73	25,41	47,59	30,44	35,40	41,60	53,50
	2	20,54	24,18	19,77	22,62	24,09	39,87	28,44	31,19	36,31	47,60
	3	18,14	24,53	21,01	22,62	22,91	41,65	28,45	29,30	41,37	50,46
	4	16,41	21,75	22,83	23,58	20,09	44,05	28,39	29,46	37,54	46,10
	5	18,35	21,22	22,84	23,77	19,26	44,85	28,43	29,06	38,67	47,39
	6	17,93	21,19	16,92	19,90	20,03	43,55	29,74	30,11	36,19	48,47
	7	19,53	22,08	20,79	24,79	20,97	44,51	30,79	32,91	34,59	49,05
	8	18,78	22,02	24,88	25,19	20,24	46,60	32,00	31,15	36,76	49,66
	9	22,66	25,47	21,36	23,34	22,81	45,38	32,28	34,12	39,61	49,08
	Ortalama	18,96	23,26	21,13	23,28	21,76	44,23	29,88	31,41	38,07	49,03
AOK	1	21,55	21,88	21,67	21,31	22,68	39,62	30,74	32,98	43,61	44,20
	2	17,20	23,15	20,29	23,36	19,75	35,40	30,40	32,72	38,73	47,05
	3	19,75	22,90	19,54	19,00	20,25	36,37	29,79	34,13	38,52	47,07
	4	20,63	23,89	22,45	20,45	18,59	36,98	28,81	37,10	36,78	46,83
	5	17,60	24,12	21,89	22,12	17,56	36,36	30,39	37,02	36,80	46,81
	6	17,60	23,58	19,45	22,13	18,61	34,56	30,28	32,87	31,73	43,54
	7	17,72	21,78	20,44	22,00	18,49	34,21	30,27	32,14	35,72	45,76
	8	19,88	21,88	19,87	21,06	18,50	35,20	26,96	32,45	36,48	45,74
	9	21,00	23,58	20,00	21,69	20,07	35,79	26,92	32,10	34,49	45,71
	Ortalama	19,21	22,97	20,62	21,46	19,39	36,05	29,40	33,72	36,98	45,86
Cam	1	13,45	6,22	10,54	9,87	14,56	27,76	21,20	22,45	20,88	34,56
	2	12,56	6,12	10,52	10,54	14,88	29,85	18,62	22,65	21,56	32,15
	3	14,25	6,32	10,48	10,61	15,23	26,28	18,99	21,58	19,77	31,08
	4	13,78	7,30	10,48	11,29	14,98	27,65	19,25	21,98	18,99	33,45
	5	13,25	7,43	10,48	12,84	14,23	28,27	19,52	19,89	21,58	34,88
	6	13,98	7,45	11,04	12,82	14,64	27,08	21,55	20,77	22,12	33,44
	7	14,01	8,39	11,12	12,70	15,25	27,91	20,57	22,15	21,77	33,88
	8	12,89	9,22	11,77	12,69	14,13	34,52	18,51	23,15	21,85	33,21
	9	12,50	9,27	13,77	12,79	14,00	33,74	19,07	23,88	20,98	31,58
	Ortalama	13,41	7,52	11,13	11,79	14,66	29,23	19,70	22,06	21,06	33,14

Ek Tablo 2'nin devamı

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta No.	KESME-AŞINMA DERİNLİKLERİ (ha)									
		Kayac									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Olivin	1	8,28	12,19	13,39	11,26	13,56	29,36	20,22	22,85	23,81	32,90
	2	8,03	12,17	12,95	12,93	11,05	28,39	18,79	22,81	21,38	31,56
	3	8,56	10,93	12,41	13,96	11,06	24,06	16,24	22,16	21,90	27,96
	4	8,41	8,95	14,24	13,10	14,00	23,09	19,03	19,10	20,48	31,98
	5	8,80	9,14	14,24	13,04	12,29	22,93	18,49	19,95	23,12	28,72
	6	9,34	9,12	14,20	12,07	12,28	23,27	21,19	22,07	22,10	27,21
	7	8,81	8,52	14,33	11,39	12,79	28,10	22,78	24,37	23,62	28,24
	8	9,24	9,01	14,34	11,39	13,08	26,61	22,74	24,37	25,93	29,00
	9	11,89	9,51	14,36	10,45	14,96	28,51	22,47	23,42	25,31	28,79
	Ortalama	9,04	9,95	13,83	12,18	12,79	26,04	20,22	22,34	23,07	29,60
Zımpara	1	11,47	12,44	14,31	12,06	15,19	22,89	18,33	22,72	24,20	31,44
	2	7,63	12,87	14,26	14,68	12,29	25,31	17,97	21,57	20,26	29,62
	3	10,77	12,87	14,25	13,81	9,92	25,12	17,96	20,61	19,50	27,07
	4	10,78	12,91	13,88	13,56	12,43	25,74	18,34	19,68	18,91	29,96
	5	10,62	13,73	13,53	14,29	9,67	27,34	18,35	21,73	19,48	29,21
	6	10,59	13,37	12,21	14,57	10,39	29,46	18,50	19,83	18,93	29,12
	7	8,45	14,92	12,50	12,54	11,78	28,94	19,31	19,12	19,80	29,00
	8	9,28	13,90	13,96	13,57	11,70	27,79	20,52	18,57	21,22	29,40
	9	9,21	14,03	13,77	14,61	11,27	24,41	20,96	18,58	19,36	28,26
	Ortalama	9,87	13,45	13,63	13,74	11,63	26,33	18,92	20,27	20,18	29,23
Çelik	1	18,12	25,12	28,82	23,36	19,88	43,02	41,78	36,78	45,50	53,38
	2	17,52	28,45	25,13	22,88	20,18	44,31	41,77	37,12	45,55	51,45
	3	16,88	24,52	27,78	22,58	18,75	39,67	39,69	33,88	43,17	48,27
	4	19,22	23,16	25,55	23,01	18,02	38,84	38,57	34,58	41,90	44,70
	5	19,42	25,88	26,87	22,81	17,88	39,01	36,21	35,15	39,60	44,71
	6	18,12	25,12	26,12	22,05	19,58	40,85	35,10	35,22	38,78	41,68
	7	18,45	25,25	26,40	23,55	20,55	40,74	35,09	34,88	38,87	42,86
	8	18,20	25,00	26,00	23,98	19,53	35,85	33,91	35,66	40,38	42,88
	9	18,14	26,01	25,88	23,03	18,79	43,16	34,00	34,87	38,24	42,87
	Ortalama	18,23	25,39	26,51	23,03	19,24	40,61	37,35	35,35	41,33	45,87
Plastik	1	2,45	2,52	2,88	2,88	3,54	9,57	6,89	7,57	8,05	15,38
	2	2,16	2,88	2,95	2,16	3,68	10,18	6,66	7,81	7,71	15,71
	3	2,55	2,23	3,10	2,55	3,40	10,11	6,67	7,79	7,71	14,17
	4	2,35	2,45	2,85	1,98	3,74	9,53	6,04	6,52	7,70	13,61
	5	2,20	2,58	2,64	2,55	3,50	10,89	6,05	7,70	7,22	11,34
	6	2,12	2,68	2,51	2,95	3,50	9,35	6,65	7,60	7,22	11,70
	7	1,88	2,78	2,60	2,98	3,44	9,03	5,21	6,19	6,75	11,60
	8	2,35	2,36	2,85	3,01	3,40	8,20	5,45	6,81	6,81	13,70
	9	2,52	2,25	2,86	2,95	3,35	10,13	6,67	7,28	7,25	12,16
	Ortalama	2,29	2,53	2,80	2,67	3,51	9,67	6,25	7,25	7,38	13,26

Ek Tablo 3. Kesim yüzeylerinden 2 cm aralıklarla ölçülen yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri (ölçme derinliği: 1 cm)

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta No.	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜKLERİ (R_a)									
		Kayaç									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Garnet	1	8,56	4,95	6,10	4,58	5,64	8,20	7,83	5,82	8,67	8,32
	2	11,43	5,43	8,71	4,71	7,56	7,79	10,08	8,78	9,30	10,71
	3	10,73	5,32	6,60	5,08	5,73	5,61	6,32	7,03	8,43	8,76
	4	8,45	5,69	6,97	5,09	6,85	7,32	6,37	8,78	7,44	9,35
	5	10,66	5,50	6,43	4,14	6,85	7,22	6,56	7,81	7,58	11,14
	6	10,47	6,77	6,57	5,53	8,25	8,06	7,75	8,24	10,03	11,85
	7	8,66	8,70	6,59	5,47	6,22	5,82	7,65	6,57	11,45	11,91
	8	X*	6,41	6,69	4,19	X	7,54	8,85	9,88	8,69	11,98
	9	10,72	6,14	6,75	4,83	6,78	9,36	6,77	7,24	6,57	6,70
	Ortalama	9,96	6,10	6,82	4,85	6,74	7,44	7,58	7,79	8,68	10,08
AOB	1	X	6,02	6,52	6,12	4,98	9,24	10,82	10,38	8,48	9,01
	2	9,12	10,24	6,49	6,67	5,61	11,36	10,25	8,52	8,64	8,02
	3	10,20	7,81	5,49	7,09	6,26	10,00	10,23	9,76	8,99	8,88
	4	11,94	9,38	6,74	4,91	10,37	8,93	8,67	10,01	7,62	8,65
	5	X	7,48	5,84	5,80	6,18	11,89	8,66	8,02	12,85	7,05
	6	9,95	10,73	5,62	6,48	5,61	11,01	9,73	8,92	8,26	11,58
	7	X	6,94	5,74	6,02	5,33	10,72	7,42	11,28	8,84	11,44
	8	X	9,06	5,34	5,09	6,83	8,36	8,59	8,47	9,05	7,75
	9	X	7,08	6,90	5,69	6,13	9,93	10,95	9,80	7,86	11,62
	Ortalama	10,30	8,30	6,08	5,99	6,37	10,16	9,48	9,46	8,95	9,33
AOK	1	12,36	6,90	6,75	7,86	7,73	8,36	11,72	7,76	11,28	6,83
	2	11,99	7,73	4,81	5,78	9,54	8,14	9,11	9,40	7,38	4,35
	3	8,57	9,19	7,42	5,25	10,49	7,80	12,28	8,86	10,07	8,49
	4	16,32	8,68	5,94	4,49	6,49	9,65	9,30	10,15	10,07	11,00
	5	16,15	6,60	5,42	5,07	7,05	8,68	10,25	8,93	10,77	10,09
	6	11,56	6,61	5,32	5,12	X	6,44	9,58	8,77	10,77	14,49
	7	12,58	7,96	5,46	6,83	7,17	6,68	11,01	8,88	8,44	11,90
	8	12,01	9,56	5,90	4,67	X	7,02	9,56	8,25	6,98	11,22
	9	X	8,55	5,32	4,73	X	9,29	10,23	8,47	8,65	9,70
	Ortalama	12,69	7,98	5,82	5,53	8,08	8,01	10,34	8,83	9,38	9,79
Cam	1	9,06	9,87	7,71	6,96	5,00	12,35	8,31	9,21	12,69	9,13
	2	10,25	8,49	7,48	6,69	6,11	14,13	12,12	9,11	12,65	8,88
	3	10,48	7,96	7,73	6,37	5,17	11,50	8,11	8,93	10,37	11,43
	4	11,95	7,35	9,23	7,07	5,12	17,02	8,52	11,84	11,88	8,57
	5	11,89	9,34	6,37	4,14	5,78	8,96	11,18	7,74	12,77	8,89
	6	11,52	8,76	6,44	5,16	6,21	11,83	12,10	8,65	10,22	9,32
	7	10,65	10,27	7,58	5,22	5,25	10,83	8,54	6,25	X	9,45
	8	10,65	8,86	7,06	5,15	6,11	X	9,14	8,91	11,75	8,93
	9	10,21	9,01	8,48	3,42	5,87	X	X	X	X	9,45
	Ortalama	10,74	8,88	7,56	5,58	5,62	12,37	9,75	8,83	11,76	9,34

Ek Tablo 3'ün devamı

Aşındırıcı	Ölçüm Nokta No.	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜKLERİ (R _a)									
		Kayac									
		Andezit	Lamprofir	Bazalt	Mermer	Traverten	Limra-1	Limra-2	Kayseri Tüf	Rize Tüf	Bayburt Tüf
Olivin	1	12,52	X	6,59	5,87	3,96	11,56	10,61	6,28	7,55	9,89
	2	X	7,20	6,75	5,32	X	10,80	X	3,63	7,69	10,52
	3	X	9,72	5,46	5,74	X	11,85	13,08	5,59	8,52	8,08
	4	X	X	5,60	5,41	8,86	X	11,48	5,67	7,74	8,22
	5	X	8,05	7,79	5,35	5,58	X	7,41	6,03	12,15	8,12
	6	7,00	X	5,67	4,51	5,90	9,57	9,85	4,69	8,98	12,96
	7	12,94	X	6,54	5,01	6,58	9,77	X	5,43	11,12	9,39
	8	X	8,97	6,87	5,00	4,73	10,26	7,10	6,74	9,20	8,34
	9	X	6,46	5,69	4,55	5,85	11,14	13,54	5,43	8,86	8,44
	Ortalama	10,82	8,08	6,33	5,20	5,92	10,71	10,44	5,50	9,09	9,33
Zımpara	1	X	9,49	5,36	5,17	5,12	11,75	9,74	8,33	12,32	8,98
	2	X	X	6,08	4,59	X	11,96	11,02	8,92	8,13	9,66
	3	9,47	X	6,01	6,96	4,17	9,93	9,44	10,54	9,63	8,77
	4	X	X	6,23	5,39	X	11,14	X	7,46	8,48	9,44
	5	X	X	4,77	5,30	3,27	X	X	6,88	10,13	9,11
	6	X	9,53	8,46	6,63	X	12,37	11,72	9,59	6,95	9,24
	7	14,69	8,23	5,85	5,85	X	11,81	8,92	9,70	7,67	9,44
	8	X	8,16	8,59	5,17	4,86	15,43	7,98	3,36	8,89	9,01
	9	X	X	6,27	4,70	4,21	X	8,69	6,90	9,68	9,00
	Ortalama	12,08	8,85	6,40	5,53	4,33	12,06	9,64	7,96	9,10	9,18
Çelik	1	10,88	7,19	9,88	6,57	8,36	14,84	11,01	5,80	9,08	9,23
	2	11,88	10,16	9,13	6,29	7,95	12,12	10,37	8,89	10,66	8,48
	3	X	X	10,29	7,09	X	10,03	11,53	8,02	8,58	8,61
	4	11,92	8,45	7,48	5,55	7,30	X	9,92	8,20	X	X
	5	10,25	8,75	X	7,47	8,21	X	X	8,95	9,91	X
	6	X	7,77	7,94	6,45	X	10,98	8,99	9,01	X	14,05
	7	12,10	X	8,88	7,02	8,12	8,83	11,10	8,28	X	9,60
	8	X	9,78	X	5,99	X	X	11,93	8,26	9,11	X
	9	11,52	X	9,15	6,58	8,25	X	X	7,08	11,93	X
	Ortalama	11,43	8,68	8,96	6,56	8,03	11,36	10,69	8,05	9,88	9,99

*X: Ölçüm alınamadı

Ek Tablo 4. t tablosu

α	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
Tek yönlü	0.50	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
Çift yönlü	1.00	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291

Ek Tablo 5. F tablosu ($\alpha = 0,05$)

df2	df1										
	1	2	3	4	5	6	7	8	12	24	1000
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	243.9	249.1	254.2
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.41	19.45	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.74	8.64	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	5.91	5.77	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.68	4.53	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.00	3.84	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.57	3.41	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.28	3.12	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.07	2.90	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	2.91	2.74	2.54
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.69	2.51	2.30
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.53	2.35	2.14
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.42	2.24	2.02
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.34	2.15	1.92
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.28	2.08	1.85
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.09	1.89	1.63
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	1.95	1.74	1.45
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.85	1.63	1.30
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.76	1.53	1.11

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimini Eskişehir’de tamamladı. 2011 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı; 2016 yılında aynı bölümde, “Su Jetiyle Kayaç Kesmede Çeşitli Aşındırıcıların Kullanımı” başlıklı teziyle yüksek lisans eğitimini tamamladı ve 2017 yılında doktora eğitimine başladı. Halen ilgili bölümde doktora eğitimini ve görevini sürdürmekte olan Kaya’nın yabancı dili İngilizcedir.

