



## Farklı ayrışma derecesindeki andezitlerde mikrokırık sıklığı ve mikrokırık uzunluğundaki değişimin incelenmesi: İzmir-Bayraklı andezit taş ocakları örneği

### *The investigation of variations in the microcrack frequency and microcrack length in andesites with different weathering grades: an example of İzmir, Bayraklı andesite quarries*

TÜMAY KADAKÇI KOCA <sup>1\*</sup>, MEHMET YALÇIN KOCA <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

Geliş (*received*): 3 Ekim (*October*) 2022 Kabul (*accepted*): 6 Aralık (*December*) 2022

#### ÖZ

İzmir, Bayraklı ilçesi, Çiçek mahallesinde bulunan terkedilmiş andezit taş ocakları günümüzde yerleşim alanı içerisinde kalmaktadır. Farklı ayrışma derecelerindeki andezitlerde artan boşluk suyu basıncı ve ayrışma derecesine bağlı olarak duraylılık sorunları meydana gelmektedir. Bu çalışmada, ayrışma derecesiyle, ince kesitler üzerinde ölçülen mikrokırıkların uzunluklarının ve en önemlisi farklı yönlerdeki mikrokırık sayısının ilişkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda, mikrokırık ölçümleri gerek ince kesit gerekse taramalı elektron mikroskobu görüntüleri üzerinde yapılarak ayrışma derecesi tayini yapılmıştır. Ancak, birçok çalışmada, mikrokırık uzunluğunun belirlenmesinde kullanılan yöntem öklid uzunluğu (iki nokta arasındaki doğrusal uzaklık) eşitliğine dayanmaktadır. Aslında mikrokırıklar nadiren doğrusaldır ve çoğunlukla yüzeyde pürüzlü çizgiler olarak görülür. Bu nedenle, az, orta ve ileri derecede ayrışmış andezit örnekleri üzerinde mikrokırıklar bilgisayar programında sayısallaştırılarak, kartezyen obje uzunluğu hesaplamasıyla gerçeğe yakın, yüksek hassasiyette mikrokırık uzunlukları ölçülmüştür. Mikrokırık uzunluklarının, ayrışma derecesiyle pozitif ve güçlü bir korelasyona sahip olduğu belirlenmiştir. Mikrokırık yönelimlerinin ince kesit üzerinde yatay ve düşey traverslerde ölçülen mikrokırık sayılarını etkilediği ve iki yöndeki farkın ayrışma derecesinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** mikrokırık sıklığı, mikrokırık uzunluğu, andezit, ayrışma, yönserlik

**ABSTRACT**

*The abandoned andesite quarries in İzmir, Bayraklı, Çiçek district remains in the settlement area at present time. Stability problems occur in andesites with various weathering grades due to the increasing pore pressure and weathering grade. In this study, it was aimed to investigate the relationships between the microcrack length, especially the number of microcrack measurements on thin sections, and the weathering grade. To date, studies on weathering grade determination with microcrack measurements either on the thin section or scanning electron microscope images have been performed. However, in most of the previous studies, the method that based on Euclidian distance (linear distance between two points) equation was utilized to measure the microcrack length. Indeed, the microcracks are barely linear and they present mostly rough lines on the surface. For the reason, the microcracks in slightly, moderately, and highly weathered andesite samples were measured with high precision and a realistic approach by digitizing them via computer software in cartesian object length computation. It was determined that the length of the microcracks has a positive and significant correlation with the weathering grade. It was revealed that the orientations of microcracks effect the number of microcracks that measured along horizontal and vertical traverses and the difference between two traverses increases with the increasing weathering grade.*

**Keywords:** microcrack frequency, microcrack length, andesite, weathering, anisotropy

<https://doi.org/10.17824/yerbilimleri.1183501>

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: tumaykoca@gmail.com

**GİRİŞ**

Ayrışma derecesi, kayanın fiziksel, kimyasal, mekanik ve petrografik özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, bahsedilen kaya özellikleri kullanılarak andezitlerin ayrışma derecesinin tayin edilmesi bugüne kadar birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Saito, 1981; Koca, 1995; Karpuz ve Paşamehmetoğlu, 1997; Arıkan vd., 2007; Koca ve Kıncal, 2016). Ayrışmanın kayalar üzerindeki doğrudan etkisi, mineralojik ve kimyasal değişimler ve fiziksel değişimler olarak iki grupta sınıflandırılabilir (Ceryan, 2012; 2018). Kayalar genellikle mikroskobik kırıklar içerirler (Simmons ve Richter, 1976; Kranz, 1983) ve mikrokırıklar ayrışmanın fiziksel etkilerini ortaya koyarlar. Onodera vd. (1974) granitlerdeki mikrokırık sayısının ve açıklığının ayrışma derecesinin artmasıyla arttığını belirtmişlerdir. Ayrışmayla mineral taneleri arasındaki boşluklar gevşemekte ve büyümektedir. Önerdikleri mikrokırık yoğunluğu indisi ( $\rho_{cr}$ ) 1 mm'den daha az genişliğe sahip kırıkları kapsamaktadır (Eşitlik 1).

$$\rho_{cr} = (\text{mikrokırıkların toplam genişliği})/(\text{ölçüm profilinin uzunluğu}) \times 100 \quad (1)$$

İrfan ve Dearman (1978) toplam mikrokırık sıklığını ( $I_r$ ) (Eşitlik 2) ince kesit üzerinde traversler boyunca sayılan mikrokırık ve boşlukların sayısı olarak tanımlamıştır. Bu araştırmacılar, İngiltere'deki ayrılmış granitlerin ince kesitleri üzerinde her biri 10 mm uzunluğunda 7 travers kullanarak mühendislik petrografisi çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Temiz ve dolgu içermeyen boşluklar, benekli ve/veya dolgulu mikrokırıklar ayrı ayrı belirlenerek sayılmıştır ancak bu kırıkların nasıl ayırt edileceğine yönelik bir yönerge bulunmamaktadır.

$$I_r = (\text{mikrokırık sayısı})/(10 \text{ mm}) \quad (2)$$

Mikrokırık sıklığından farklı olarak, birim alandaki toplam mikrokırık uzunluğu olan mikrokırık yoğunluğunu ( $\rho_{mc}$ ) dikkate alan ayrışma indisi farklı araştırmacılar tarafından önerilmiştir (Dixon 1969; Davis 1984; Tuğrul 1995) (Eşitlik 3).

$$\rho_{m\phi} = (\text{mikrokırıkların toplam uzunluğu})/(\text{birim alan (1 mm}^2\text{)}) \quad (3)$$

Daha güncel olarak, Sousa vd. (2005) granitler üzerinde çizgisel kırık yoğunluğu (LCD) kavramını önermiştir. Milimetredeki kırık sayısı olarak tanımlanan bu indis, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü üzerinde toplam uzunluğu 50 mm olan hat boyunca kırık sayısını temsil etmektedir (Eşitlik 4).

$$\text{LCD} = (\text{mikrokırık sayısı})/(50 \text{ mm}) \quad (4)$$

Momeni vd. (2015) ise Sousa vd. (2005)'in önerdiği eşitliğin aynısını kullanarak, mikrokırık sayısının SEM görüntüsü üzerinde değil ince kesit üzerinde belirlenmesini önermiştir. Yukarıda değinilen çalışmalardan anlaşıldığı üzere mikrokırık çalışmaları granit ve bazaltlar üzerinde yoğunlaşmıştır. Derinlik kayaları olan granit, diyorit, granodiyoritler hemen hemen eş boyutlu kristallerden oluşan holokristalen doku göstermektedirler. Kristaller birbirleriyle temas halinde oldukları için dokanak oluştururlar. Bu nedenle, ince kesitlerde daha büyük alanlar içinde veya daha uzun traverslerle mikrokırık yoğunluğunu ve mikrokırık uzunluğunu ölçmek mümkün olmaktadır. Ancak, volkanik kayalarda iri kristaller arasında volkanik cam veya mikrolitler yer aldığı için ince kesitlerde uzun traversler boyunca inceleme yapmak oldukça güçtür. Bu nedenle daha küçük alanlar ve daha kısa travers hatlarında çalışma yürütülmek durumundadır. Bir diğer anlatımla, çalışmaların ince kesitin tüm boyunu veya tüm enini kapsayan kesit ve alanlarda değil, fenokristal boyutunda yapılması gerekmektedir. İzmir'de yer alan andezitlerde ise genelde fenokristal boyları 1-4 mm mertebesindedir. Bu nedenle, mikrokırıklarla ilgili ölçümler tane içi (intragranular) ölçümler ile yapılacaktır.

Diğer taraftan, literatürde taranan mikrokırık uzunluğunun hesaplanmasıyla ilgili çalışmaların çoğunda bu uzunluk, kırığın

başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki en kısa mesafe olan doğrusal öklid mesafesini ölçmeye dayalıdır. Birçok çalışmada ise mikrokırık uzunluğun nasıl ölçüldüğüne dair bilgi verilmemiştir. Mikrokırıkların belirlenebilmesi için bugüne kadar gerek daha geleneksel olan ve Underwood (1967) tarafından önerilen manuel stereolojik yöntem (Tapponnier ve Brace 1976; Wong 1985; Fredrich vd. 1989, Tuğrul 1995; Wu vd. 2000; Heap vd. 2014) veya son dönemde yaygınlaşan sayısal görüntü işleme analizlerinden (Åkesson et al. 2004; Obara 2007; Rigopoulos vd. 2011; Rigopoulos vd. 2013; Arena vd. 2014; Delle Piane vd. 2015; Healy vd. 2017; Griffiths vd. 2017, Monticelli vd. 2021) faydalanılmaktadır. Ancak, daha önce belirtildiği gibi, uzunlukları boyunca mikrokırıklar pürüzlü bir morfolojiye sahiptir. Girintili-çıkıntılı bir uzanımına sahip kırıkların uzunluklarının en doğru şekilde saptanması ancak bilgisayar ortamında sayısallaştırma yapıp, kartezyen obje uzunluğu algoritmasıyla yay uzunluğu hesaplanarak sağlanabilmektedir. Aksi takdirde, görsel veya oransal olarak bu hassasiyette doğru bir ölçüm yapmak girinti ve çıkıntılı morfoloji nedeniyle mümkün değildir. Bu nedenle, bu çalışmada mikrokırık uzunlukları bir Coğrafi Bilgi Sistemleri programı olan MapInfo v.17.0 (Precisely, 2018) kullanılarak hesaplanmıştır.

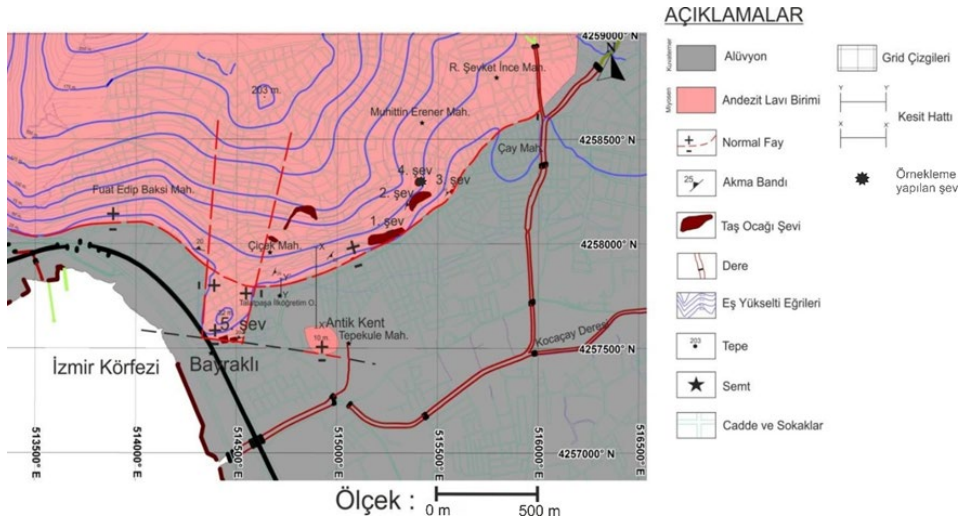
Mikrokırık sıklığı, toplam mikrokırık uzunluğu ve yönserliği konularının bir arada andezitler için çalışılmadığı görülmektedir. Mikrokırıklar makro yenilmenin öncüleri ve göstergeleri oldukları için kaya kütesindeki kırık ilerlemesi hakkında bilgi vermeleri açısından kaya mühendisliğinde önem taşımaktadır. Çalışma alanı üzerinde yerleşim bulunan İzmir Bornova'daki terkedilmiş taş ocaklarını kapsadığından, yenilme durumunda can ve mal kaybı oluşturabilecek bir lokasyondadır. Bu nedenle, fiziksel özelliklerin tayini (porozite

ve yoğunluk), tüm kayaç kimyasal analizleri, ince kesitlerde modal analizler, sayısal ortamda ince kesit görüntüleri üzerinde yatay ve düşey yönde değişen mikrokırık sıklığı ( $X_{yatay}$ ,  $X_{düşey}$ ,  $mm^{-1}$ ) ve birim alanda toplam mikrokırık uzunluğu ( $\Sigma L_{mç}$ , mm) ölçümleri yapılarak veriler arasındaki ilişkiler ayrışma dereceleri de dikkate alınarak incelenmiştir. Böylelikle, mikrokırık sıklığının

yönlere bağlı değişiminin, toplam mikrokırık uzunluğu ve ayrışma derecesi ile ilişkisi ortaya konulmuştur.

### ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ

Çalışma alanı, İzmir'in Bayraklı ilçesine bağlı olan Çiçek Mahallesi'ndeki terkedilmiş andezit taş ocaklarıdır. Çalışma alanında yüzeyleyen kaya birimi Neojen tortullarını uyumsuz olarak üzerleyen Yamanlar volkanikleridir (Şekil 1).



**Şekil 1.** Çalışma alanı jeoloji haritası

**Figure 1.** Geological map of the study area

İzmir Körfezi'nin kuzeyinde ve güneyinde Yamanlar volkaniklerini temsil eden Geç Miyosen yaşlı andezitler lavlar ve bunların piroklastikleri şeklinde oldukça geniş alanlar kaplamaktadırlar. Andezit birimi Akartuna (1962) tarafından ojit-biotik andezit olarak tanımlanmıştır.

Andezitler oluşumları sırasındaki akma ve soğuma olayları nedeniyle oldukça kırıklı ve çatlaklı bir yapı gösterirler (Şekil 2). Gevşek dokulu ve sık kırıklı olan bu volkanik kütlelerin yüzeyi bölgesel iklim koşulları ve suların etkisiyle ayrışmıştır. Derinliği 1,5-2 m'ye ulaşan

yüzeysel ayrışmanın yanı sıra, tektonik aktiviteyle ilgili makaslama çatlaklarıyla akma bantları ve soğuma yüzeyleri boyunca killeşme gözlenmektedir (Koca, 1995). Sahada ISRM (2007)'nin önerdiği niteliksel ayrışma sınıflamasına göre az, orta ve ileri derecede ayrışmış (SW, MW ve HW) yüzeyler gözlenmektedir. Çalışma alanının güneyinde yükseltinin az, topografyanın düz olduğu Kocaçay Deresi boyunca alüvyonlar gözlenmektedir. Yamaç molozu ve alüvyon, andezit çakıl ve bloklarını, kum, silt ve kil boyutundaki malzemeleri içermektedir.

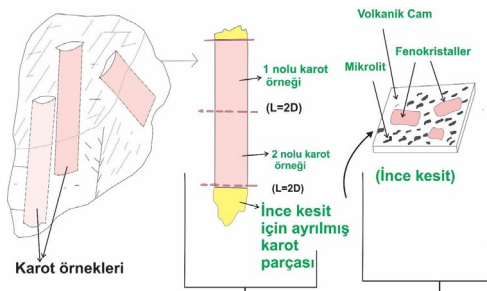


**Şekil 2.** Çalışma alanı arazi görünümü

*Figure 2.* Field view of the study area

## YÖNTEMLER

İzmir, Bayraklı, Çiçek mahallesindeki terk edilmiş şevlerden Şev-4 üzerinde, ISRM (2007) dikkate alınarak, farklı ayrışma derecelerine sahip (az, orta ve ileri derecede ayrışmış) kaya blokları toplanmıştır (Şekil 1). Bu bloklardan, ince kesit çalışmaları ve tüm kayaç kimyasal analizleri ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi için parçalar alınmıştır (Şekil 3).



**Şekil 3.** Kaya bloklarından örnek hazırlama yönteminin şekilsel gösterimi

*Figure 3.* Illustration of sample preparation from rock blocks

Silindirik karot örneklerinin suya doyurma yöntemiyle kuru ve suya doygun birim hacim ağırlık ( $\gamma_{kuru}$ ,  $\gamma_{doy}$ ,  $kN/m^3$ ) ve porozite (%)

hesaplamaları ISRM (2007) önerdiği yöntemlere göre yapılmıştır.

Ayrışma derecesinin sayısal olarak ifade edilmesi için İzmir yöresindeki andezitik birimlere özgü olarak Koca ve Kıncal (2016) tarafından geliştirilen ve kimyasal bir indeks olan "Ayrışma İndeksi (WI)" kullanılmıştır (Eşitlik 5). Bu indeksin kullanılabilmesi için Avanta $\Sigma$  model Atomik Absorbsiyon Spektrometre (AAS) cihazında yapılan tüm kayaç kimyasal analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Kızdırma Kaybı değeri LOI olarak verilmektedir.

$$WI = (LOI(\%)) / (CaO + MgO + MnO) * 100 \quad (5)$$

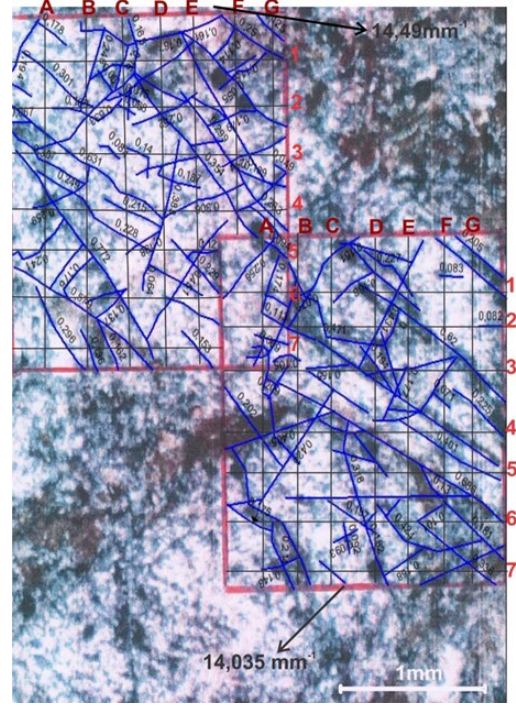
Ayrışma dereceleri doğru bir şekilde tanımlanmış andezit örneklerinden hazırlanmış 5 adet ince kesit üzerinde (SW:1 adet, MW:2 adet, HW:2 adet) mikrokırık sayısı ve uzunluğu ölçümleri andezitleri en iyi temsil eden ve genellikle andezin bileşimine sahip plajiyoklaz fenokristalleri üzerinde yapılmıştır. Çalışmalarda alttan aydınlatmalı polarizan mikroskop kullanılmıştır. Petrografik olarak incelenen ince kesitlerin boyutları 50x25 mm'dir. Modal analizlerde geleneksel olan nokta sayma yöntemi (Folk 1951) dikkate alınarak yapılmıştır. Mikrokırık yoğunluğunun saptanmasında genellikle 2.5x bazen de 4x ve 10x büyütmeli mercekler kullanılmıştır. Mikrokırıkların devamının görülebilmesi ve görüntü netliği için 2.5x büyütmeli konumda çalışmak daha uygun olmaktadır. 4x ve 10x büyütmeli mercekler dilimlerin mikrokırıklardan ayırt edilmesi için kullanılmıştır. 10x büyütmeli mercek çok ince kırıkları ve boşlukları mikroskopta ayırt etmek için kullanılmıştır. 1-4 mm uzunluğa erişen plajiyoklaz fenokristalleri üzerinde mikrokırıklarla ilgili ölçümler iki farklı yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu yöntemlerden ilki; fenokristal üzerinde 1 mm x 1 mm = 1 mm<sup>2</sup>'lik alanlar içinde yer alan kırıkların toplam uzunluğunun saptanması şeklinde uygulanan alansal tekniktir. Bu yönetime göre, ince kesitlerden alınan

görüntüler MapInfo v. 17.0 (Precisely, 2018) bilgisayar programı kullanılarak metrik koordinat sisteminde tanımlaması yapılarak üzerlerindeki mikrokırıklar sayısallaştırılmıştır. 11 adet 1 mm<sup>2</sup>'lik alanda toplam mikrokırık uzunlukları ( $\Sigma L_{mç}$ , mm) belirlenmiştir. Sayısal bir ortamda elde edilen bu uzunlukların ölçüm hassasiyeti 0.001'dir. İnce kesit görüntüsü üzerinde 1 mm x 1 mm boyutlarında (1 mm<sup>2</sup>) kareler oluşturulmuş (grid ağları) ve bu kareler içinde ölçüm ve travers atma işlemleri yapılmıştır (Şekil 4). Aynı kristal üzerinde birden fazla 1 mm<sup>2</sup>'lik alanlar oluşturulmuş ve ölçümler bu alanlar içinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç aynı fenokristal üzerindeki mikrokırık yoğunluğunun farklı alanların olması nedeniyle ölçümlerden doğacak hata payını azaltmaktır. Bir diğer anlatımla, aynı kristal üzerinde mikrokırık yoğunluğu alansal olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu durumdan kaynaklanacak hata payını minimuma çekebilmek için, aynı kristal üzerinde farklı alanlarda ölçümler yapılmıştır.

Bu çalışmada plajiyoklaz mineralinde dilinimden itibaren bir genişleme veya bir açılma ya da dilinim boyunca bir yer değiştirme varsa o dilinim mikrokırık olarak dikkate alınmıştır. Buna ek olarak, ince kesitlerde dilinimlerden itibaren bir kalınlaşma veya dilinim boyunca kil oluşumu (ince kesitte siyah benekler kırık hattında bir koyuluk olarak gözlenmektedir) varsa, bu çalışmada o dilinim de mikrokırık olarak dikkate alınmıştır. Bazen ince kesit hazırlanması sırasında, kesitten parça kopmakta ve kopan parçaların yerleri de siyah renkte gözlenmektedir. Tüm bu farklar ince kesit çalışmalarında ayırt edilmiştir. Ayrıntı gerektiren durumlarda 10x büyütme lensi kullanılmıştır.

İkinci yöntemde ise 1 mm<sup>2</sup>'lik alanlar içinde eşit aralıklarla yatay ve dikey yönde traversler atarak 1 mm'lik hat boyunca mikrokırık



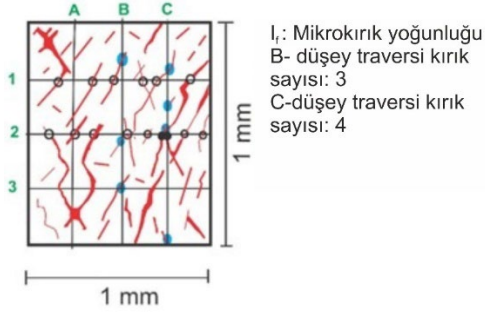
Şekil 4. HW<sub>1</sub> ince kesiti üzerinde kırıkların çizilmesi ve uzunluğunun ölçülmesi

Figure 4. Sketching the microcracks and measurement of their length on thin section of HW<sub>1</sub>

yoğunluğunun hesaplanmasıyla yapılan çizgisel tekniktir (Eş. 6).

$$I_f = (\text{mikrokırık sayısı}) / (1 \text{ mm}) \quad (6)$$

Yatay ve dikey traversler arası mesafe 0,25 mm'dir. Böylece 1 mm<sup>2</sup>'lik alan üzerinde 0,25 x 0,25 mm'lik grid ağları oluşturulmuştur. Buna göre, toplamda 102 adet dikey ve yatay travers ölçümü yapılmıştır. Yatay traversler 1, 2, 3, ...7 numaralarla, dikey traversler ise A, B, C, D, E, F simgeleriyle gösterilmiştir (Şekil 5). Ayrışma süreçleri kırıklardan itibaren gelişmektedir. Yüzey suları kırıklara nüfuz etmekte ve bu yüzeyler boyunca mineraller dengelerini kaybetmekte ve hidroliz nedeniyle kil minerallerine dönüşmektedir.



**Şekil 5.** Yatay ve düşey traversler ve simgeleri

**Figure 5.** Horizontal and vertical traverses and their symbols

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### Modal Analiz ve Fiziksel Özellikler

Porozite ve yoğunluk değişimlerinin kontrol edilmesi ayrışma derecesi sınıflamasının

doğru yapılmasını sağlamaktadır. Çünkü kayaların porozitesi ( $n$ ) arttıkça ayrışma derecesi de artmaktadır. Buna bağlı olarak, mikrokırık sayısı ve açıklığı da artmaktadır (Onodera vd. 1974). Tablo 1 incelendiğinde, porozite değerlerinin 1,75% ile 13,05% arasında değiştiği ve ayrılmış örneklerde arttığı görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak da birim hacim ağırlık değerleri ayrılmış numunelerde azalmaktadır.

Volkanik kayaların tümünde olduğu gibi andezitlerde de porfiritik doku gözlenmiştir. Bu doku türünde volkanik cam içerisinde iri kristaller (fenokristaller) bazen gelişigüzel bazen de yönlenecek yer almaktadır. Matris volkanik camı ve mikrolitlerden oluşabildiği gibi sadece volkanik camdan da oluşabilir. Mikrolitler ve iri kristaller lav akışına koşut olarak yönlenebilir ve bu durumda volkanik kayalarda bir akma dokusu ortaya çıkabilir.

**Tablo 1.** Az (SW), orta (MW) ve ileri derecede (HW) andezitlerin incelenen fiziksel ve mineralojik özellikleri

**Table 2.** Physical and mineralogical properties of slightly (SW), moderately (MW), and highly (HW) weathered andesite

Ayrışma Derecesi	SW <sub>1</sub>	MW <sub>1</sub>	MW <sub>2</sub>	HW <sub>1</sub>	HW <sub>2</sub>
Fiziksel Özellik					
Y <sub>kuru</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	23,41	21,77	22,04	20,54	21,01
Y <sub>doy</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	23,84	22,90	22,65	21,94	22,08
n (%)	1,75	4,22	4,95	10,89	13,05
Modal analiz					
Fenokristal (%)	54	52	51	40	43
Matris (%)	46	48	49	60	57

Plajiyoklaz (%)	51,5	60,2	58	59,6	57,5
Piroksen (%)	13	10,5	9	2,5	6
Amfibol (%)	18	11,6	13	17,8	16
Biyotit (%)	12	10	10	11,4	10
Opak mineraller (%)	5	6	7	7,20	8
Serbest kuvars, ikincil kalsit ve kil mineralleri (%)	0,5	1,5	2,0	2,0	2,5

İncelenen tüm kesitlerde plajiyoklazlar andezitlerde baskın mineral olarak yer almaktadır (Tablo 1). Bu nedenle andezit kayasının gerek mikrokırıklılık gerekse de buna bağlı ayrışma durumunu yansıtacak tek mineral grubu plajiyoklazlardır. Bu değerlendirmede biyotit fenokristalleri de bir ölçüde dikkate alınabilir ancak tüm kayaç içinde %6-%13 arasındaki bir oranda yer almaktadır. Bu nedenle, biyotitler andezitleri yeterince veya tek başına temsil edemez. Ayrıca biyotitlerde gelişmiş tek yöndeki dilinimler ince kesit çalışmalarında mikrokırıklarla kolaylıkla karıştırılmaktadır. Plajiyoklazlarda üç yönde gelişmiş belirgin dilinimler (klivajlar) ince kesitlerde kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Mikroskop altında, tek düzlemde iki yönlü dilinimler soluk bir görünümde ve kesme şekeri görüntüsü vermektedir. Kayaç dokusunda, kuvars mineralleri serbest kuvars olarak bulunmaktadır. Bu nedenle kimyasal bileşim analizinde SiO<sub>2</sub> değerinde artışa neden olmazlar. Tablo 1'de görüldüğü üzere, serbest kuvars yüzdesi %5'in altında bulunmaktadır. Ayrışma derecesi arttıkça fenokristal/matriks oranının da azaldığı görülmektedir.

#### Kimyasal Analiz ve Ayrışma Derecesi Tayini

Andezitler için ayrışmada en etkili bileşenler CaO, MgO ve MnO'dir (Koca ve Kınal, 2016).

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O ve K<sub>2</sub>O oranlarında önemli değişimler gözlenmemiştir. Ayrışma derecesi arttıkça MnO, MgO, and CaO değerleri azalmaktadır, öte yandan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve kızdırma kaybı (LOI) değeri artmaktadır (Tablo 2).

**Tablo 2.** SW, MW ve HW andezitler için majör element analiz sonuçları

**Table 2.** Major element analyses results for SW, MW, and HW andesites

	SW <sub>1</sub>	MW <sub>1</sub>	MW <sub>2</sub>	HW <sub>1</sub>	HW <sub>2</sub>
SiO <sub>2</sub>	60,33	62,1	63,14	62,3	61,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,89	16,23	17,12	17,05	17,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,44	6,86	6,42	6,12	6,24
MgO	3,01	2,05	2,55	2,20	1,91
CaO	5,11	3,28	3,28	2,56	2,79
Na <sub>2</sub> O	2,86	2,67	2,64	1,74	2,20
K <sub>2</sub> O	3,45	3,24	3,43	3,10	3,06
TiO <sub>2</sub>	0,67	0,78	0,69	0,69	0,75
MnO	0,13	0,10	0,06	0,12	0,11
LOI*	1,12	1,90	1,90	3,40	3,36
Toplam	100,01	99,21	101,23	99,28	99,34
WI (%)	13,57	34,99	32,25	69,67	69,85

\*Kızdırma kaybı

Eşitlik-5 kullanılarak numunelerin ayrışma dereceleri belirlenmiştir. Buna göre, andezitlerde ayrışma derecesi arttıkça WI değeri artmaktadır. Buna ek olarak, WI değeri kızdırma kaybı arttıkça da artmaktadır.



### Mikrokırık Ölçümleri

Bu çalışmada, farklı ayrışma derecelerindeki andezit örneklerinden alınan ince kesitler üzerinde alansal ve çizgisel olarak mikrokırık ölçümleri bilgisayar ortamında sayısallaştırılarak yapılmıştır. Bu yöntemlerle, pürüzlü bir yapıya sahip olan kırıkların uzunlukları daha düşük bir hatayla gerçek uzunluğa en yakın olacak biçimde ölçülmüştür.

Plajiyoklaz minerali, andezit örneklerinde en çok bulunan ve kolay ayrışabilen mineral olduğundan tane içi mikrokırık ölçümleri plajiyoklaz mineralleri üzerinde yapılmıştır.

1 mm<sup>2</sup>'lik 11 birim alanda toplam 102 travers çalışmasının sonuçları değerlendirilmiştir. Mikrokırık sıklığı ölçümlerinde yatay ( $X_{yatay}$ ) ve düşey traversler ( $X_{düşey}$ ) üzerinde sayılan kırık sayıları Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** SW, MW ve HW andezit örneklerinin ince kesitleri üzerindeki mikrokırık ölçümleri

**Table 3.** The microcrack measurements on the thin-sections of SW, MW, and HW andesites

Ayrışma derecesi	Mikrokırık özellikleri	Alan-I	Alan-II	Alan-III	Alan-IV
SW	$X_{yatay}$ (mm <sup>-1</sup> )	3,66	4,00	4,33	-
	$X_{düşey}$ (mm <sup>-1</sup> )	5,66	6,33	8,66	-
	$\Sigma L_{mç}$ (mm)	9,638	8,620	9,226	-
	$X_{yatay}/X_{düşey}$	0,646	0,632	0,500	-
MW	$X_{yatay}$ (mm <sup>-1</sup> )	6,50	7,00	7,25	7,50
	$X_{düşey}$ (mm <sup>-1</sup> )	8,50	9,50	10,00	10,25
	$\Sigma L_{mç}$ (mm)	10,620	11,520	12,154	13,220
	$X_{yatay}/X_{düşey}$	0,764	0,736	0,725	0,731
HW	$X_{yatay}$ (mm <sup>-1</sup> )	9,43	9,14	11,83	11,66
	$X_{düşey}$ (mm <sup>-1</sup> )	11,71	10,86	9,66	8,16
	$\Sigma L_{mç}$ (mm)	14,490	13,050	17,520	17,498
	$X_{yatay}/X_{düşey}$	0,805	0,842	1,224	1,428

Gerek alansal ölçümlerden (1 mm<sup>2</sup>'lik alandaki toplam mikrokırık uzunluğu) gerekse de çizgisel teknik kullanılarak gerçekleştirilen ölçümlerden (1 mm uzunluğundaki traverslerdeki kırık sayısı) elde edilen sonuçlar yüksek oranda benzerlik sunmaktadır. Her iki tekniğin kullanılmasıyla elde edilen

sonuçlardaki en önemli farklılık ise mikrokırık yoğunluğu ölçümlerinden elde edilen ortalama değerlere ait standart sapmalar en yüksek SW andezitler için elde edilirken, mikrokırık uzunluğunda bu durum tersinedir. Bir diğer anlatımla, mikrokırık uzunluğu ölçümlerinde en

yüksek standart sapma değerleri ileri derecede ayrılmış (HW) andezitler için elde edilmiştir.

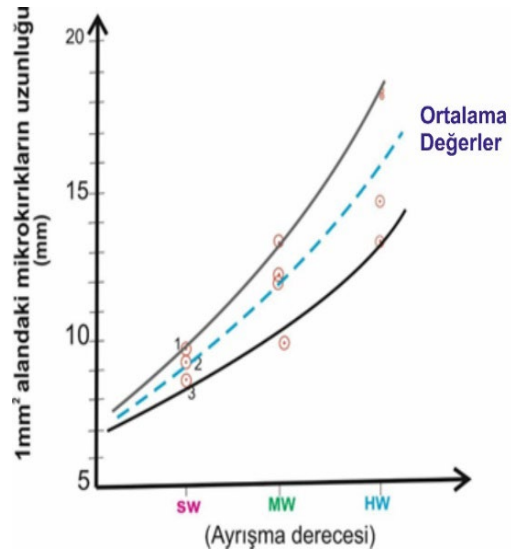
Farklı derecede ayrılmış andezitler içindeki plajiyoklaz minerallerindeki toplam mikrokırık uzunluğunun ( $\Sigma L_{m\check{c}}$ ) ayrışma derecesine göre değişimi (alansal inceleme) Şekil 6'da sunulmuştur.

Andezitlerde yer alan plajiyoklaz mineralleri üzerinde  $1 \text{ mm}^2$ 'lik alanlara denk gelen toplam mikrokırık uzunluklarının ayrışma derecesine göre dağılımı (grafikteki saçılımı) SW andezitlerden HW andezitlerine doğru artan bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu sonuç standart sapma (SD) değerlerindeki önemli farklardan kaynaklanmaktadır. İleri derecede ayrılmış andezitlerin ortalama mikrokırık toplam uzunluğu için elde edilen standart sapma değeri, MW andezitlerin 2,04 katı ve SW andezitlerin ise 4,5 katıdır. Az ayrılmış andezitlerde mikrokırıkların toplam uzunlukları üç farklı alanda sırasıyla 9,638 mm, 8,62 mm ve 9,226 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama mikrokırık uzunluğu  $9,1613 \text{ mm} \pm 0,512$  olarak belirlenmiştir (Şekil 7).

MW andezitlerde mikrokırıkların toplam uzunluğu dört farklı alanda sırasıyla 9,815 mm, 11,52 mm, 12,154 mm ve 13,22 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama mikrokırık uzunluğu  $11,879 \pm 1,094 \text{ mm}$  olarak belirlenmiştir. MW andezitlerdeki plajiyoklaz mineralleri için  $1 \text{ mm}^2$ 'deki ortalama mikrokırık toplam uzunluğu, SW andezitlerinden %21,54 oranında daha yüksek bulunmuştur. HW andezitlerdeki plajiyoklaz mineralleri için mikrokırık toplam uzunlukları (iki farklı kesitte, dört farklı alanda) sırasıyla 13,0 mm, 14,49 mm, 17,52 mm ve 17,498 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama mikrokırık toplam uzunluğu  $15,64 \pm 2,237$  olarak belirlenmiştir.

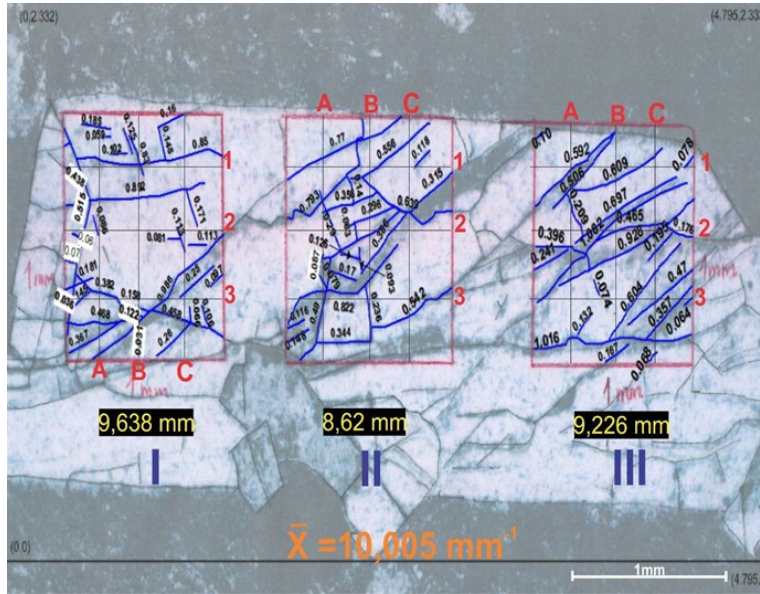
HW andezitlerdeki ortalama mikrokırık toplam uzunluğu; SW ve MW andezitlerindeki sırasıyla %41,42 ve %24,05 oranlarında daha büyüktür. Bu değerler Rigopoulos vd. (2013) tarafından ayrılmamış troktolitlerde ve diyoritlerde tane içi mikrokırıklarda ölçülen değerlerden oldukça düşüktür. Bu çalışmadaki HW andezit örneklerinden elde edilen kırık uzunlukları yaklaşık olarak Rigopoulos vd. (2013) tarafından incelenen ayrılmamış örneklerdeki mikrokırık uzunluklarına denk gelmektedir.

Farklı derecede ayrılmış andezitler içindeki plajiyoklaz mineralleri için hazırlanmış ayrışma derecesi ve mikrokırık yoğunluğu ilişkisi (çizgisel inceleme) Şekil 8'de verilmiştir.



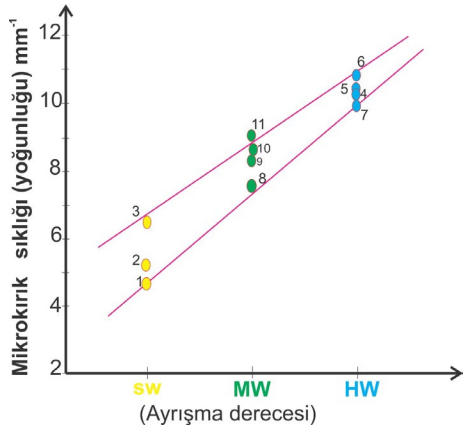
**Şekil 6.** Mikrokırıkların toplam uzunluğunun ( $\Sigma L_{m\check{c}}$ ) ayrışma derecesine göre değişimi (Alansal inceleme)

**Figure 6.** The variations in total length of microcracks with the weathering degree (Areal investigation)



**Şekil 7.** Az ayrıışmış (SW) andezit içinde yer alan plajiyoklaz minerali üzerindeki mikrokırık ölçümleri

**Figure 7.** Microcrack measurement on the plagioclase mineral in slightly weathered (SW) andesite



**Şekil 8.** Mikrokırık yoğunluğunun ayrışma derecesi ile ilişkisi (çizgisel inceleme)

**Figure 8.** The relationship between the microcrack density and the weathering grade (linear investigation)

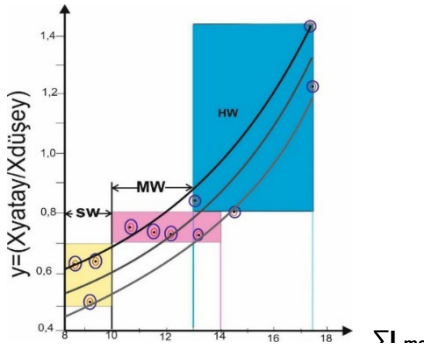
Bu ölçümlere göre, ayrışma derecesi arttıkça birim karelerdeki toplam mikrokırık uzunlukları da artmaktadır. SW andezitlerdeki plajiyoklaz

kristalleri üzerinde toplam altı travers atılmıştır. HW1 nolu ince kesit üzerinde 4x büyütme, HW2 nolu ince kesitte ise 2.5x büyütme oküler kullanılmıştır. SW, MW ve HW ayrışma derecesindeki andezitler için traverslerden elde edilen mikrokırık yoğunluğu değerlerinin dağılımı Şekil 8'de sunulmuştur. Ortalama mikrokırık yoğunluğu değerlerine bakıldığında, HW andezitlerdeki mikrokırık yoğunluğu  $(10,306 \pm 1,393)$ , MW ve SW andezitlerden sırasıyla %19,34 ve %47,21 daha fazla olduğu belirlenmiştir. (Tablo 3). Bu çalışmada elde edilen değerler, Sousa vd. (2005)'in granitlerdeki plajiyoklaz minerali (tane içi mikrokırık) için önerdiği sınıflamadaki ayrışma derecelerinden daha yüksek ayrışma derecelerine denk gelmektedir. Örneğin; SW için elde edilen kırık/mm değerleri yön dikkate alınmaksızın, 3 alan için ortalama 5,4 iken, Sousa vd. (2005) sınıflamasında orta derecede ayrıışmış ile ileri derecede ayrıışmış sınıfları arasına karşılık gelmektedir. Bu da her iki kayacın türü ve dolayısıyla dokusal özelliklerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Bu nedenle, mikrokırık sınıflamaları çalışılan bölgeye ve kayacın cinsine özgü kalmaktadır.

### Yatay ve Düşey Mikrokırık Sıklığı ve Mikrokırık Uzunluğu Arasındaki İlişkiler

Toplam mikrokırık uzunluğu ile traversler boyunca hesaplanmış ortalama yatay mikrokırık uzunluğu ( $X_{yatay}$ )/ortalama düşey mikrokırık uzunluğu ( $X_{düşey}$ ) oranları ( $y$ ) arasındaki ilişkide ayrışma derecesinin etkisi araştırılmıştır (Şekil 9). Örneğin, SW andezitlerde plajiyoklaz minerali üzerinde üç farklı birim kareden I-nolu birim karedeki toplam mikrokırık uzunluğu,  $\Sigma L_{m\check{c}} = 9,638$  mm'dir. Yatay yönde alınmış üç traversdeki ortalama kırık yoğunluğu ölçümü,  $X_{yatay} = 3,66$ , düşey yönde alınmış üç traversdeki ortalama kırık yoğunluğu,  $X_{düşey} = 5,66$  olarak belirlenmiştir.



**Şekil 9.** Toplam mikrokırık uzunluğu ( $\Sigma L_{m\check{c}}$ )  $X_{yatay}/X_{düşey}$  oranları ( $y$ ) arasındaki ilişkide ayrışma derecesinin rolü

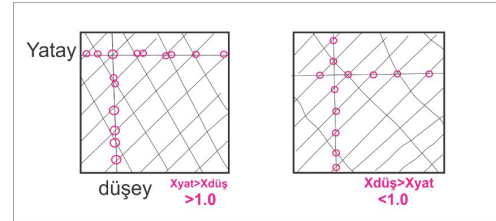
**Figure 9.** The role of weathering grade on the relationship between total microcrack length ( $\Sigma L_{m\check{c}}$ ) and Xhorizontal/Xvertical ratios ( $y$ )

Ayrışma derecesi arttıkça  $X_{yatay}/X_{düşey}$  oranları artmaktadır. Bu çalışmada toplam mikrokırık uzunluğu ( $\Sigma L_{m\check{c}}$ ) ile  $X_{yatay}/X_{düşey}$  değerleri arasında yüksek belirleme

aynı tane içindeki  $1 \times 1$  mm<sup>2</sup>'lik alanlardaki mikrokırık sıklığı değerlerinin arasındaki farkın ayrışma derecesi arttıkça azaldığı sonucu da eklendiğinde mikrokırık yönselliğinin HW andezitlerde azaldığını söyleyebiliriz. Ancak,

katsayısına sahip ( $R^2 = 0,805$ ) pozitif üstsel bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

HW örneklerde çalışılan Alan-III ve IV haricindeki her birim karede,  $X_{yatay} < X_{düşey}$  durumu bulunmuştur. Buna ek olarak, SW andezitlerdeki plajiyoklaz minerali üzerindeki birim karedeki oran en küçüktür, HW andezitlerdeki ise en büyüktür. Bu durumda SW 'den HW 'ye doğru hem  $\Sigma L_{m\check{c}}$  hem de  $X_{yatay}/X_{düşey}$  değerleri artmaktadır.  $X_{yatay}/X_{düşey}$  oranının  $>1,0$  veya  $<1,0$  olması kayacın, dolayısıyla minerallerin kırık gelişimiyle ilgilidir (Şekil 10).



**Şekil 10.**  $X_{yatay}/X_{düşey}$  oranlarının kırık gelişimi ile ilişkisi

**Figure 10.** The relation between the crack development and the Xhorizontal/Xvertical ratios

Bu durum, kırık yönelimlerine (kırık yönelimleri ile travers hattının yönüne bağlı) ve aralıklarına bağlıdır. Sonuç olarak,  $y = X_{yatay}/X_{düşey}$  oranı toplam mikrokırık uzunluğu arttıkça artmaktadır. Bu sonuca ek olarak, SW ve MW örneklerde  $y$  ile  $\Sigma L_{m\check{c}}$  arasındaki ilişki doğrusal iken, ileri derecede ayrışmış örneklerde toplam mikrokırık uzunluğu artışıyla yatay ve düşey yöndeki kırıklılık oranı üstel olarak artışa geçmektedir (Şekil 9).

Bu oranın değerinin en düşük olduğu SW örneklerinde, yatay ve düşey yöndeki farkın fazla olduğunu anlayabiliriz; böylece mikrokırık yönselliğinin en çok SW andezitlerde görüldüğü sonucuna varılabilir. Bu sonuca,

bu durum ayrışmanın mikrokırıkların yönselliğini azaltmakta olduğunu kanıtlamakta yetersiz kalmaktadır. Çünkü her iki yöndeki traverslerdeki farkın HW andezitlerde, SW andezitlere oranla azalması, toplamdaki kırık

sayısının artmasından da etkilenmiş olabilir. Bu nedenle örnek sayısının artırılması, farklı alanlardaki andezitler ile karşılaştırılmasıyla,

ayrışmanın tane içi mikrokırıkların yönserliğine anlamlı düzeyde bir katkısı olup olmadığı daha kuvvetli bir şekilde ortaya konulabilir.

## KAYNAKLAR

- Akartuna, M., 1962. On the geology of İzmir, Torbalı, Seferihisar, Urla districts. MTA Bulletin, 5, 1-19.
- Åkesson, U., Hansson, J., Stigh, J., 2004. Characterisation of microcracks in the Bohus granite, Western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. Engineering Geology, 72, 131-142. DOI: 10.1016/j.enggeo.2003.07.001
- Arena, A., Delle Piane, C., Sarout, J., 2014. A new computational approach to cracks quantification from 2D image analysis: application to micro-cracks description in rocks. Computers & Geosciences, 66, 106-120. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.01.007
- Arikan, F., Ulusay, R., Aydın, N., 2007. Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 66, 415-430. DOI: 10.1007/s10064-007-0087-0
- Ceryan, S., 2012. Weathering indices for assessment of weathering effect and classification of weathered rocks: a case study from NE Turkey. Dar, I.A., ed. Earth Sciences, IntechOpen, 664s.
- Ceryan, S., 2018. Weathering indices used in evaluation of the weathering state of rock material. Ceryan, N., ed. Handbook of Research on Trends and Digital Advances in Engineering Geology, IGI Global, 765s.
- Davis, G.H., 1984. Structural Geology of Rocks and Regions. John Wiley and Sons, New York, 492s.
- Delle Piane, C., Arena, A., Sarout, J., Esteban, L., Cazes, E., 2015. Micro-crack enhanced permeability in tight rocks: An experimental and microstructural study. Tectonophysics, 665, 149-156. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.10.001
- Dixon, H.W., 1969. Decomposition products of rock substances. Purposed engineering geological classification. Proceedings of Rock Mechanics Symposium, Sydney.
- Folk, R.L., 1951. A comparison chart for visual percentage estimation. Journal of Sedimentary Petrology, 21(1), 22-23. DOI: 10.1306/D4269413-2B26-11D7-8648000102C1865D
- Fredrich, J.T., Evans, B., Wong, T.F., 1989. Micromechanics of the brittle to plastic transition in Carrara marble. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 94(B4), 4129-4145. DOI: 10.1029/JB094iB04p04129
- Griffiths, L., Heap M.J., Baud, P., Schmittbuhl, J., 2017. Quantification of microcrack characteristics and implications for stiffness and strength of granite. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 100, 138-150. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2017.10.013
- Healy, D., Rizzo, R.E., Cornwell, D.G., Farrell, J.C.N., Watkins, H., Timms, N.E., Gomez-Rivas, E., Smith, M., 2017. FracPaQ: a MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. Journal of Structural Geology, 95, 1-16. DOI: 10.1016/j.jsg.2016.12.003
- Heap, M.J., Lavallée, Y., Petrakova, L., Baud, P., Reuschlé, T., Varley, N.R., Dingwell D.B., 2014. Microstructural controls on the physical and mechanical properties of edifice-forming andesites at Volcán de

- Colima, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 2925-2963. DOI: 10.1002/2013JB010521
- International Society for Rock Mechanics (ISRM), 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested methods prepared by the Commission on Testing Methods. Ulusay, R., Hudson, J.A., eds., ISRM. Kozan Ofset: Ankara, 628s.
- Irfan, T.Y., Dearman, W.R., 1978. Engineering classification and index properties of a weathered granite. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 17, 79-90. DOI: 10.1007/BF02634696
- Karpuz, C., Paşamehmetoğlu, A.G., 1997. Field characterization of weathered Ankara andesites. *Engineering Geology*, 46, 1-17. DOI: 10.1016/S0013-7952(96)00002-6
- Koca, M.Y. 1995. Slope stability assessment of the abandoned andesite quarries in and around the İzmir City centre. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Koca, M.Y., Kincal, C., 2016. The relationships between the rock material properties and weathering grades of andesitic rocks around İzmir, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 709-734. DOI: 10.1007/s10064-015-0813-y
- Kranz, R.L., 1983. Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, 100(1-3), 449-480. DOI: 10.1016/0040-1951(83)90198-1
- Momeni, A., Khanlari, G.R., Heidari, M., Bagheri, R., Bazvand, E., 2015. Assessment of physical weathering effects on granitic ancient monuments, Hamedan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(6), 5181-5190. DOI: 10.1007/s12665-015-4536-y
- Monticelli, J.P., Sígolo, J.B., Futai, M.M., 2021. On weathering understanding and its characterization by petrographic indices: a study case about the criterion establishment for the textural classification of rock-forming minerals under weathering. *Environmental Earth Sciences*, 80, 408. DOI: 10.1007/s12665-021-09687-3
- Obara, B., 2007. Identification of transcrystalline microcracks observed in microscope images of a dolomite structure using image analysis methods based on linear structuring element processing. *Computers & Geosciences*, 33(2), 151-158. DOI: 10.1016/j.cageo.2006.07.004
- Onodera, T.F., Yoskinaka, R., Oda, M., 1974. Weathering and its relation to mechanical properties of granite. *Proceedings of 3rd Congress of International Society of Rock Mechanics, Publ. (2A)*, Denver.
- Precisely 2018. Version 17.0 of MapInfo Pro 64 bit.
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P., Hatzipanagiotou, K., 2013. Petrographic investigation of microcrack initiation in mafic ophiolitic rocks under uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46, 1061-1072. DOI: 10.1007/s00603-012-0310-6
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P., Hatzipanagiotou, K., 2011. Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive stress. *Engineering Geology* 117(1-2), 104-113. DOI: 10.1016/j.enggeo.2010.10.010
- Saito, T., 1981. Variation of physical properties of igneous rocks in weathering. *Proceedings of the International Symposium on Weak Rocks*, Tokyo.

- Simmons, G., Richter, D., 1976. Microcracks in rocks. Ss 105-137. Strens, R., ed. Physics and Chemistry of Minerals and Rocks, John Wiley& Sons.
- Sousa, L.M.O., Suarez del Rio L.M, Calleja L., Vicente, G., Argandofia V.G.R., Rey A. R., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77, 153-168. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.10.001
- Tapponnier, P., Brace, W.F., 1976. Development of stress-induced microcracks in Westerly Granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(4), 103-112. DOI: 10.1016/0148-9062(76)91937-9
- Tuğrul, A., 1995. Niksar yöresindeki bazaltların mühendislik özelliklerine ayrışmanın etkileri. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Underwood, E.E., 1967. Quantitative Evaluation of Sectioned Material. ss 49-60. Elias H, ed. *Stereology*, Springer, Berlin Heidelberg, 338s.
- Wong, T., 1985. Geometric probability approach to the characterization and analysis of microcracking in rocks. *Mechanics of Materials*, 4(3), 261-276. DOI: 10.1016/0167-6636(85)90023-7
- Wu, X.Y., Baud, P., Wong, T., 2000. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1-2), 143-160. DOI: 10.1016/S1365-1609(99)00093-3