

Gökçeada'da Yüzeyleyen Andezit ve Riyodasit Bileşimli Kayaların İyapı Özelliklerinin Dayanım ve Deformasyon Özelliklerine Etkileri

The Effects of Micro-Textural Properties on the Strength and Deformation Characteristics of Rocks with Andesite and Rhyodasite Compositions Exposed in Gökçeada

Ömer ÜNDÜL¹, Namık AYSAL¹

¹İstanbul Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Avcılar İSTANBUL

Geliş (received) : 21 Haziran (June) 2016
Düzeltilme (revised) : 5 Ekim (October) 2016
Kabul (accepted) : 31 Ekim (October) 2016

ÖZ

Kayaların iç yapı unsurlarının, fiziksel – mekanik ve elastik özelliklere ve çatlak gelişimine etkileri bilinmektedir. Bu çalışmada; Gökçeada'nın farklı bölgelerinden alınan farklı iç yapı özelliklerine ve bileşenlerine sahip volkanik kayaların mineralojik, petrografik ve mikroyapısal unsurlarının, kayanın fiziksel, elastik ve dayanım özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, yük altında çatlak gelişim süreçlerinin belirlenmesi için ayrıntılı analizler gerçekleştirilmiştir. Çatlak gelişim süreçleri, mekanik deneylere tabi tutulan örneklerden hazırlanan ince kesitler üzerinde yapılan ayrıntılı çalışmalar ile ortaya konmuştur. Mineralojik ve petrografik incelemelerden elde edilen sayısal veriler ve gözlemler, minerallerin kütlece oranlarının özgül ağırlık ve ateşte kızdırma kaybı (LOI) değerlerini etkilediğini göstermiştir. Bununla birlikte tek eksenli sıkışma dayanımı (UCS) ve elastik özelliklerin büyük oranda petrografik özelliklere bağlı olduğu anlaşılmıştır. Volkanik kayalarda UCS değerleri, hamurun fenokristallere oranla artmasıyla azalmaktadır. Biyotit mineralinin, tek eksenli sıkışma dayanımını etkileyen tek mineral olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, opak minerallerin ve biyotitin geometrik özelliklerinin, Young modülüne etkilerinin de önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Eksenel yükler altında, çatlak gelişimi fenokristal ve hamur malzemesinin oransal dağılımı ile yakından ilişkilidir. Hamur miktarının artışı ile eksenel kırıkların arttığı gözlenmiştir. Yük etkisi ile gelişen kırıklar altere olmamış fenokristallere gelince yön değiştirmektedir. Böylece eksenel ve makaslama kırıkları fenokristal artışı ile birlikte değişmektedir. Gerilme etkisi ile gelişen kırıkların uygulanan yüke ve konumlarına göre altere olmuş ve opaklaşmış fenokristallerin içine girebileceği de yer yer gözlenmiştir. Ayrıca, UCS deney sonuçlarının ve ince kesitlerin birlikte değerlendirilmesi ile fenokristallerdeki artışın yanal deformasyonda ve dolayısıyla Poisson oranında artış oluşturduğu da belirlenmiştir. Değerlendirilen diğer özelliklerin ise çalışılan kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin zayıf olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çatlak Gelişimi, Elastik Özellikler, Fiziko-Mekanik özellikler, Gökçeada, Volkanik Kayalar

Ö.Ündül

E-posta: oundul@istanbul.edu.tr

ABSTRACT

The onset of dilation and uniaxial compressive strength of rocks are known to be affected by mineralogical, petrographical and microstructural features. In this study, volcanic rock samples with different micro-textural characteristics from different locations in Gökçeada (Turkey) were evaluated considering the effect of mineralogical, petrographical and microstructural features on their physical and mechanical properties. Furthermore, detailed analyses were also used to understand the cracking processes under axial loads. The analyses of the cracking processes were evaluated by using thin sections obtained from the mechanically tested specimens. The results from the quantitative mineralogical and petrographical studies and observations from thin sections revealed that the mineral mass fractions have an effect on the specific gravity and loss-on-ignition (LOI) values. On the other hand, uniaxial compressive strength (UCS) and elastic properties are mostly affected by petrographic variables (e.g., mineral content). The UCS values tend to decrease with a relative increase in the groundmass with respect to the phenocryst content and vice versa. Biotite is the only mineral that influences the UCS individually. Geometric features (e.g., Feret's diameter and perimeter) of opaque minerals and biotite are found to be important constituents influencing the Young's modulus of the rocks. Under axial loads, crack propagation is strongly dependent on the proportional distribution of the phenocryst and groundmass. It is observed that increasing groundmass content leads to predominantly axial cracks. The cracks tend to bend or propagate as a boundary crack when they reach the boundary of an unaltered phenocryst. Thus, axial and shear cracks co-exist with increasing amounts of phenocrysts, which hinder the crack propagation. Occasionally, cracks can penetrate the altered or opaque phenocrysts, depending on the degrees of orientation (with respect to applied load) of the same minerals. Furthermore, the synthesis of the measurements obtained from UCS tests and thin section observations reveals that an increase in the amount of phenocrysts, which promote the formation of more shear cracks in addition to axial cracks, causes an increase in the radial strain and Poisson's ratio. The other factors investigated have minor effects on the physical and mechanical properties of the studied rocks.

Keywords: *Crack Propagation, Elastic Properties, Physico-Mechanical Properties, Gökçeada, Volcanic Rocks.*

GİRİŞ

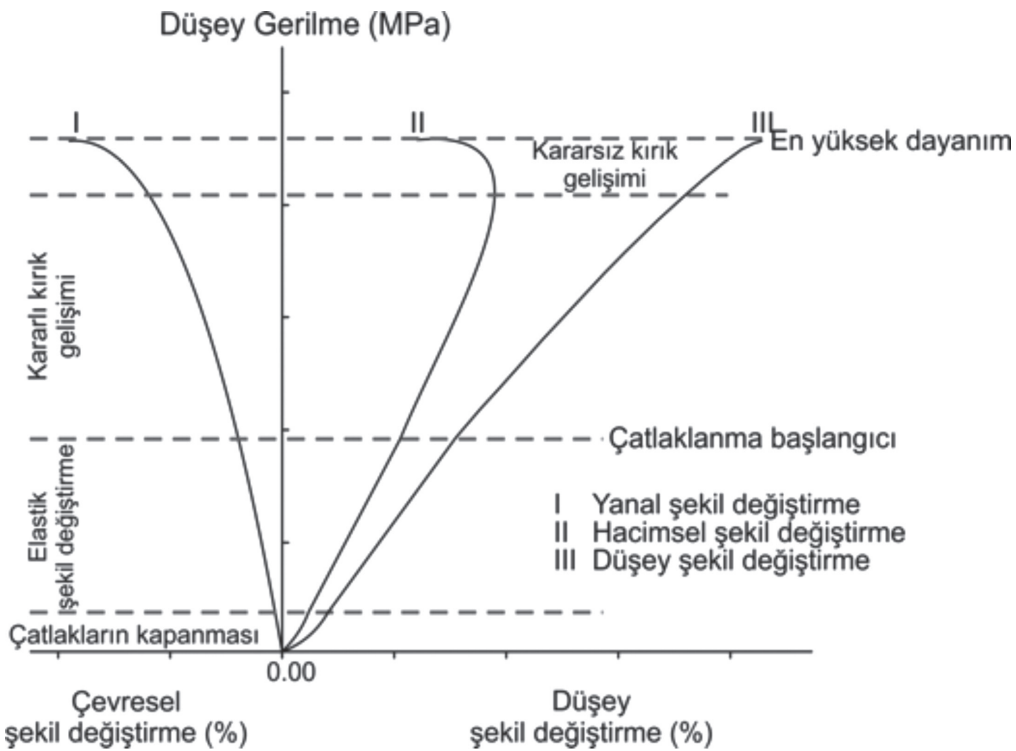
Kayaların yükler altındaki davranışlarının mineralojik bileşim, petrografik ve yapısal özellikler ile yakından ilişkili olduğu bilinmektedir (Přikryl, 2006; Ündül vd., 2015). Bu bağlamda, yük altındaki kayaların davranışlarındaki farklılıkların sebeplerinin ortaya konması, mühendislik çalışmalarında önemli bir yer teşkil etmektedir. Damarlı kayalar

gibi heterojen unsurlar içeren masif kayalarda, davranış farklılıklarının olacağı genel bir bilgidir (Amann vd., 2014). Diğer yandan, kaya dayanımındaki değişiklikler, gözle görülebilecek ölçekte heterojenlik gözlenmeyen ve mineralojik bileşenleri nispeten homojen kayalarda da gözlenmektedir (Eberhardt vd., 1999; Přikryl, 2006). Tapponnier ve Brace (1976), kayanın yenilme süreçlerindeki değişimlerinin kayayı

oluşturan pek çok bileşen tarafından kontrol edildiğini ve kaya içerisindeki en küçük bileşenlerin bile kayanın davranışı üzerinde önemli etkiler yapabileceğini ortaya koymuştur.

Kayaların aksel yükler altındaki davranışları Brace (1964) ve Bieniawski (1967)'den beri bilinmektedir (Şekil 1). Şekil 1'de verildiği gibi, kayaların aksel yükler altındaki yenilme süreci çatlakların kapanması, doğrusal elastik davranış, çatlaklanma başlangıcı, duraylı fissür gelişimi ve duraysız fissürlerin büyüme gelişmesi ile açıklanmaktadır. Çatlak yoğunluğunun kritik değeri aşması durumundan sonra, çatlakların birleşmesiyle kayanın yenilmesi gerçekleşmektedir.

Çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri ve en yüksek dayanım değerlerinin tane boyu ile ilişkileri Hatzor ve Palchik (1997) ve Eberhardt vd. (1999) tarafından tartışılmıştır. Nicksiar ve Martin (2013a ve b), ise tane boyutlarındaki heterojenliğin σ_{CI} ve tek aksenli sıkışma dayanımı (UCS) üzerindeki önemini vurgulamıştır. Ayrıca, iç yapıdaki değişikliklerin σ_{CI} ve UCS üzerindeki etkisi ve önemi Nicksiar ve Martin (2013b), Amann vd. (2014) ve Ündül vd. (2015) tarafından değerlendirilmiştir. σ_{CI} ve UCS üzerinde minerallerin tekil etkileri ise Tapponier ve Brace (1976), Räsänen (2004), Lan vd. (2010), Mahabadi vd. (2012) ve Ündül vd. (2015) tarafından vurgulanmıştır.



Şekil 1. Gerilme şekil değiştirme grafiği üzerinde tek aksenli yükler altındaki temel kırılma mekanizmaları (Brace, 1964 ve Bieniawski, 1967'den değiştirilerek).

Figure 1. Stress-strain diagram showing basic fracture mechanisms under uniaxial compression (modified from Brace, 1964 and Bieniawski, 1967).

İç yapının σ_{C1} üzerindeki etkilerinin yanısıra fiziksel özelliklere, tek eksenli sıkışma dayanımına ve diğer mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı pekçok çalışma da bulunmaktadır. Bu çalışmalar genelde, mineral tanelerinin sayımına dayanan modal analizi ve petrografik değişkenlerin tanımlanmasını kapsamaktadır (Ulusay vd., 1994; Tuğrul ve Zarif, 1999; Yılmaz vd., 2011; Gupta ve Sharma, 2012; Yeşiloğlu-Gültekin vd., 2013). Bu ve benzeri çalışmalarda kaya iç yapısındaki heterojenliklerden dolayı çelişen sonuçların ortaya çıktığı da bilinmektedir (Prikryl, 2006). Bu nedenle, nitel incelemelere ek olarak sayısal petrografik incelemeler (Howarth ve Rowlands, 1986; Prikryl, 2001, 2006; Åkesson vd., 2004; Öztürk vd., 2004; Zorlu vd., 2004; Tandon ve Gupta, 2013) ile sayısal mineralojik araştırmalar (Coggan vd., 2013; Amann vd., 2014; Ündül vd., 2015) kaya mekaniği çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır.

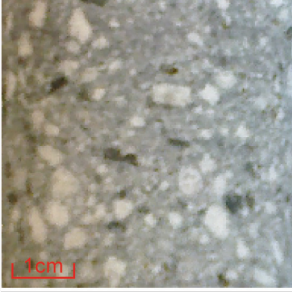
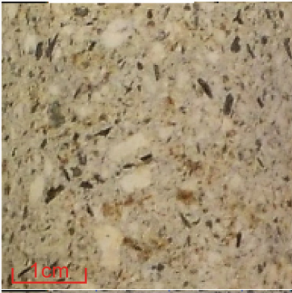

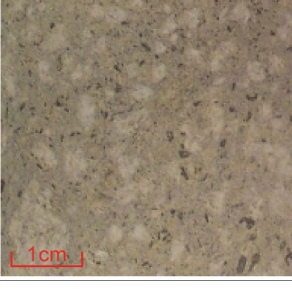
Yukarıda verilen deneysel ve sayısal çalışmalar ile iç yapının; kayaların dayanımı, çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri ve fiziksel özelliklerdeki değişimlere etkisi pekçok yönden ele alınmıştır. Ancak mineral tanelerinin türü, farklı minerallerin ve hamur malzemesinin bir aradaki davranışları, bunların oransal dağılımları gibi parametrelerin kaya dayanımı ve çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerine

etkileri konularında literatürde eksiklikler bulunmaktadır.

Bu çalışma ile Çanakkale – Gökçeada'da yüzeyleyen ve bölgede Hisarlıdağ volkanikleri adı altında (Akartuna, 1950; Temel ve Çiftçi, 2002; Koral vd., 2009) değerlendirilen volkanik kayaların iç yapıları sayısal olarak tariflenmiş ve bu özelliklerin kayaların dayanımı, çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri ve fiziksel özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir. Araştırmaya konu olan kayalar genel olarak feldspat (çoğunlukla plajioklaz), amfibol, biyotit, nadiren kuvars ve hamurdan oluşmaktadır (Çizelge 1). Hamur genel olarak felsitik karakterli olup, gözle ayırt edilemeyecek kadar ince feldspat ve kuvars tanelerinden oluşmaktadır. Kayalar genel olarak andezit ve riyodasit bileşimindedir.

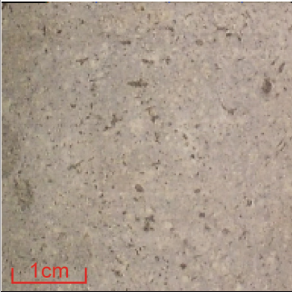
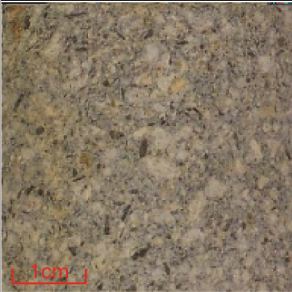


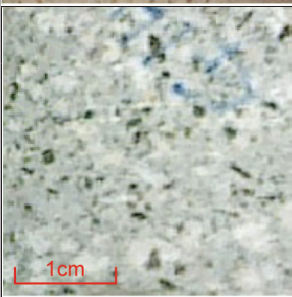
Araştırma sırasında, tek eksenli sıkışma dayanımı testleri, mineral bileşimlerinin sayısal olarak değerlendirmesine olanak sağlayacak şekilde modal mineralojik analizler, X-ışını kırınım analizleri ve değerlendirmeleri, mekanik deneylerden önce ve sonra sayısal petrografik analizler (tane boyları, mineral ve hamurun alansal dağılımı vb.) gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Sayısal XRD analiz sonuçları.
Table 1. Quantitative XRD results.

Örneklerin tipik görüntüsü	Örnekleme Bölgesi	Örnek Nu.	Amfibol (%)	Biyotit (%)	Kil min. (%)	Ortoklaz (%)	Plajiyoklaz (%)	Kuvars (%)	Magnetit (%)
	L1	1	4.2	2.3	1.0	21.9	48.3	13.1	2.7
		2	3.1	2.1	1.5	23.5	47.8	13.0	2.6
		3	4.0	2.1	2.0	22.8	46.4	13.5	2.9
		4	4.9	2.5	1.1	23.5	45.6	13.3	2.8
	L2	5	18.9	1.3	1.2	25.1	26.6	11.9	0.7
		6	18.6	1.4	1.6	24.1	26.9	11.2	0.5
		7	19.4	1.8	1.2	24.4	25	12.1	0.7
		8	17.6	0.5	1.5	24.0	28.9	10.2	0.2
	L3	9	17.1	1.3	1.2	21.9	35.9	14.5	1.8
		10	16.9	0.8	1.4	21.5	36.4	14.3	1.9
		11	15.2	0.5	1.5	21.6	39.4	14.6	1.2
		12	16.1	1.2	1.5	21.2	37.5	14.0	1.7
	L4	13	2.5	0.4	6.50	20.0	51.1	8.9	2.8
		14	2.6	3.1	8.30	19.6	47.4	9.6	2.9
		15	2.0	2.9	8.20	19.6	48.1	9.9	2.9

Ündül, Aysal

Çizelge 1. (devamı)
Table 1. (cont'd.)

		16	1.30	0.40	11.1	22.0	37.3	22.8	1.5
		17	0.9	0.20	11.9	21.9	37.3	22.5	1.3
	L5	18	1.0	0.30	10.7	23.3	36.6	22.6	0.9
		19	1.2	0.50	10.2	23.2	36.9	23.1	0.9
		20	6.9	1.6	5.4	21.0	40.9	12.0	2.7
		21	6.7	1.8	3.6	22.7	42.3	12.0	2.0
	L6	22	6.7	1.7	4.7	21.6	41.2	11.8	2.6
		23	5.7	1.9	4.0	22.1	41.8	12.4	2.3
		24	6.3	1.9	4.2	21.6	42.7	12.0	2.8
		25	10.1	1.1	4.7	20.7	43.5	14.0	3.0
		26	9.7	3.0	4.6	20.3	43.2	13.8	2.9
	L7	27	8.9	1.6	6.3	20.3	45.9	9.9	3.0
		28	9.6	2.9	4.6	20.7	42.9	13.9	2.9
		29	1.1	0.5	2.0	25.1	42.3	23.3	0.9
		30	1.0	0.9	2.1	26.3	38.2	25.5	0.8
	L8	31	-	-	-	-	-	-	-
		32	-	-	-	-	-	-	-
		33	6.2	2.5	6.5	21.0	37.0	13.8	2.7
		34	14.7	1.7	5.7	17.2	41.0	16.1	1.4
	L9	35	19.5	1.5	7.9	16.3	36.5	12.6	2.2

1-15, 20-28 ve 33-35 arası örnekler andezit bileşimli, 16-19 ve 29-32 arası örnekler riyodasit bileşimindedir.

Kil min.: Klorit, vermikülit ve smektit minerallerinin kütlece oranlarının toplamı

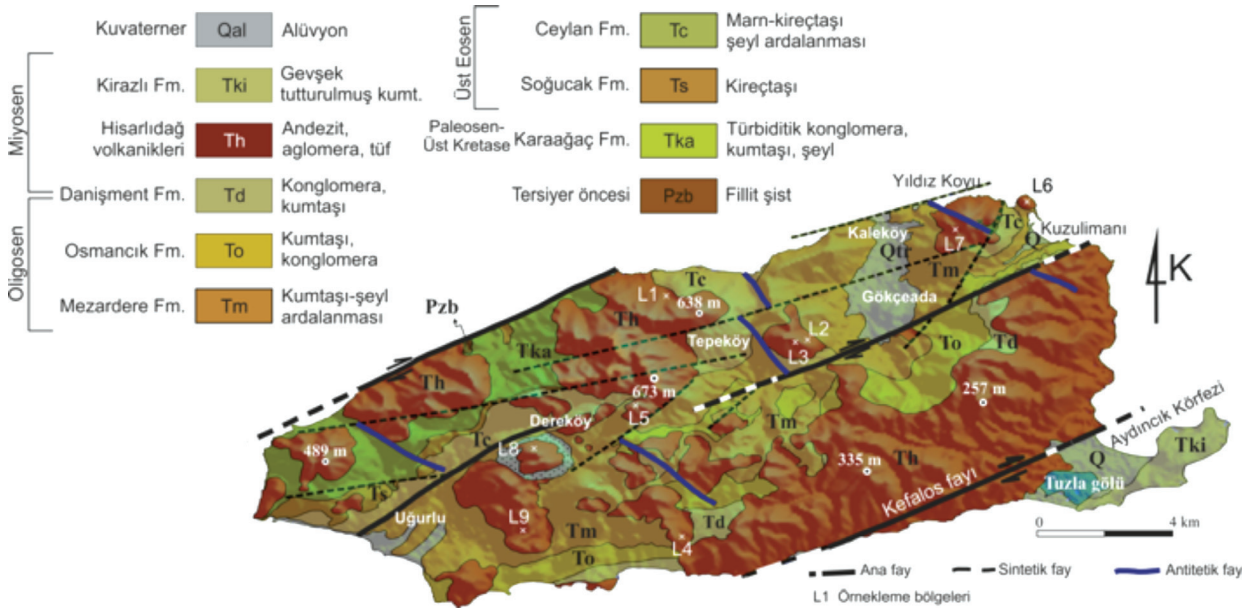
Bu tabloda sadece ana bileşenlere ait kütlece oranların verildiği göz önünde bulundurulmalıdır.

YÖNTEMLER

Örneklerin Alınması

Bu çalışma sırasında kullanılan örnekler Gökçeada'nın farklı bölgelerinden (Şekil 2), 50x50x50 cm boyutlu bloklar olarak ayrışma etkisinden uzak olacak şekilde, ANON (1995)'e göre taze - az ayrışmış seviyelerden alınmış, gözle görülebilecek boyutta heterojen bir yapı (damar vb.) içermemelerine dikkat edilmiştir. Laboratuvara getirilen bloklardan karot örnekleri, akma yüzeyine dik doğrultuda alınmıştır.

alınarak öğütülmüş ve Bruker AXS D8 marka cihaz ile Co K α radyasyonunda inceleme yapılmıştır. Toz örneklerin 2.5-80° 2 θ açıları, 1° /dakika ilerleme hızında analiz edilmiştir. DIFFARCplus (Bruker AXS) ve Rietveld analiz programı AutoQuan (GE SEIFERT) yazılımları kullanılarak örneklerin kalitatif ve ardından sayısal mineralojik bileşimleri belirlenmiştir. Burada elde edilen değerler, çalışmanın bundan sonraki kısmında, minerallerin "kütlece oranı" olarak ifade edilecektir. Bunun yanında kızdırma



Şekil 2. Çalışma alanının jeoloji haritası (Koral vd. 2009'dan değiştirilerek) üzerinde örnek yerlerinin gösterimi.

Figure 2. Geological map of the study area (modified from Koral et al. 2009) showing the sampling locations.

Sayısal Mineralojik ve Petrografik Analizler

Mekanik deneylerde kullanılan tüm örnekler üzerinde mineralojik bileşimlerin tariflenebilmesi için X-ışını kırınım analizleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan örnekler 0.5 mm boyutunun altına indirildikten sonra, örnekleri temsil edecek şekilde bir kısmı

kaybı (LOI) değerleri örneklerin 1050 C°'de ısıtıldıktan sonraki ağırlık değişimi ile tespit edilmiştir.

Mekanik deneylerde kullanılan bütün örneklerden, deney öncesinde ve sonrasında ince kesitler hazırlanmıştır. Yüklere bağlı kırık gelişiminin izlenebilmesi için ince kesitler

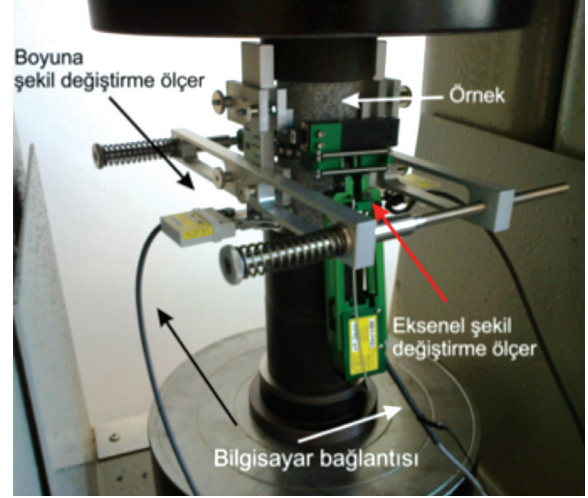
uygulanan yüke paralel olacak şekilde hazırlanmış ve kesit yapımından önce, gerilmelere bağlı kırıkların daha kolay tespit edilebilmesi için yarı akışkan mavi bir sıvı örnekler emdirilmiştir. İnce kesitlere ait dijital görüntüler NIS Elements Görüntüleme yazılımı 4.00'ı kullanan Nikon Digital Sight DS_U3 sistemi ile elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler ImageJ v1.46r (Rasband, 2012) görüntü analiz programı yardımıyla analiz edilmiştir.

Petrografik çalışmalarda 180 mikrondan büyük mineraller detaylı incelenmiştir. Bu boyuttan küçük mineraller hamura dahil edilmiş olup, bu boyutun altındaki minerallerin homojen olarak benzer boyutlarda olduğu gözlenmiştir. Petrografik incelemeler sırasında incelenen her bir mineral tanesinin Feret çapı ve çevresi tek tek ölçülmüştür. Bu ölçümler minerallerin kapladığı alanların ve birbirlerine göre oransal bolluklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Her bir mineral için hesaplanarak bulunan alansal dağılımlar bu çalışmada mineralin "alansal dağılımı" olarak ifade edilmiştir.

Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı Deneyleri

Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyleri servo-hidrolik kontrollü 2000 kN kapasiteli test cihazında gerçekleştirilmiştir. Düşey ve yanal şekil değiştirmeler 0.001 mm hassasiyette kaydedilmiştir (Şekil 3). Deneyler sırasında, 43 mm çaplı 35 adet karot örneğinin boyutları ve yükleme yüzeylerinin paralelliği ISRM (2007)'de önerilen yöntemle göre belirlenmiştir. Deney sırasında, dijital geri bildirim, çevresel şekil değiştirme ile sağlanmış ve kullanılan kontrol değeri 0.02 mm/dk olarak belirlenmiştir. Böylece karot örneği üzerine gelen yüklerin

deformasyon kontrollü olarak sabit bir hızda artması sağlanmıştır.



Şekil 3. Tek eksenli deney düzeneği.

Figure 3. Experimental setup for the uniaxial strength test.

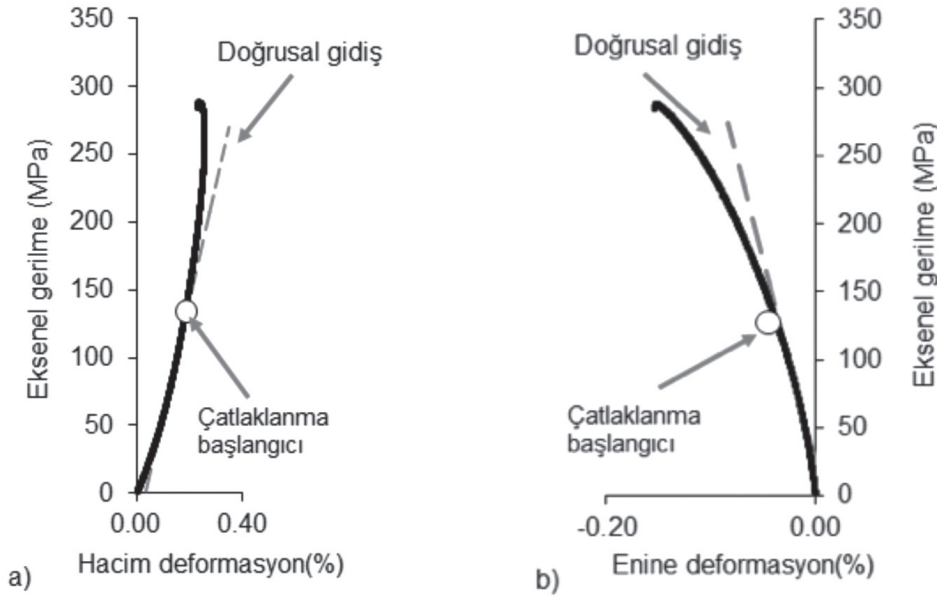
Yenilme Başlangıcının Belirlenmesi

Tek eksenli yükler altında, kayada çatlaklanma başlangıcının belirlenmesi için gerilme – şekil değiştirme özellikleri esas alınarak ve bu esasa dayanacak şekilde mikro-ses aktivitesine göre önerilen yöntemler literatürde verilmiştir (Brace vd., 1966; Lajtai, 1974; Martin ve Chandler, 1994; Nicksiar ve Martin, 2012; Moradian vd., 2016).

Nicksiar ve Martin (2012), Amann vd. (2011 ve 2014) ve diğer pekçok araştırmacı tarafından güvenilirlikleri değerlendirilmiş olan farklı iki yöntem, bu çalışmada tek eksenli deneylerde çatlaklanma başlangıcının (σ_{C1}) belirlenmesi için kullanılmıştır. Bu yöntemlerden ilki, gerilmeye bağlı hacimsel deformasyon eğrisinin doğrusallıktan saptığı andaki en düşük eksenel gerilme değeridir (Brace vd., 1966) (Şekil 4a). Diğer yöntem ise, gerilme altında çevresel şekil

değiştirme eğrisinin doğrusallıktan saptığı nokta olarak ifade edilmektedir (Lajtai, 1974) (Şekil 4b).

amfibol, biyotit ve kuvarslardan oluştuğu, sayısal XRD sonuçları ile belirlenmiştir. Çizelge 2’de ise, petrografik incelemeler ile elde edilen



Şekil 4. Çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerinin belirlenmesinde esas alınan yöntemler a) Brace vd. (1966)’nın önerdiği yöntem b) Lajtai (1974)’ün önerdiği yöntem.

Figure 4. Methodologies used to determine the crack initiation stress levels a) method proposed by Brace et al. (1966) b) method proposed by Lajtai (1974).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Mineralojik ve Petrografik Bulgular

Çalışmalar sırasında elde edilen sayısal XRD sonuçları, örneklerin genel görünüşleri ile birlikte Çizelge 1’de verilmiştir. Örneklerin genelde feldspat (ortoklaz ve plajiyoklaz),

ana bileşenlerin alansal dağılımları verilmiştir. Hamur malzemesinin alansal dağılımının en yüksek olduğu ve tüm örnekler için % 46.6 - % 79 arasında değiştiği görülmektedir. Petrografik incelemeler sırasında mikroskopta tespit edilebilen feldspatların tamamına yakını plajiyoklaz türündedir (Şekil 5). Bu durum, XRD

Ündül, Aysal

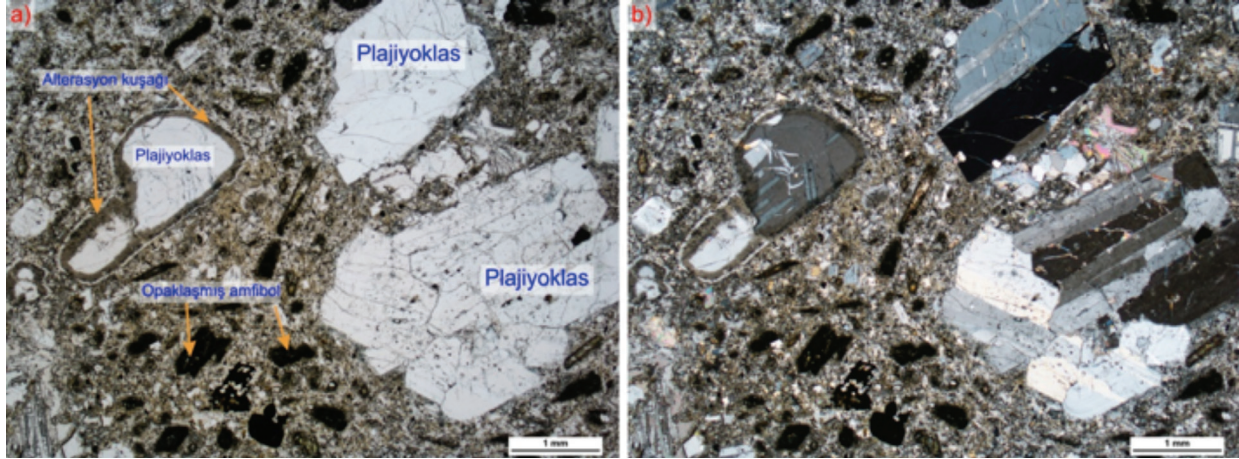
Çizelge 2. Çalışılan kayaları oluşturan hamur ve ana minerallerin normalize edilmiş alansal dağılımları.

Table 2. Normalized areal distribution of groundmass and main constitutive minerals of the studied rocks.

Örnek Nu.	Hamur (%)	Amfibol (%)	Biyotit (%)	Plajiyoklaz feldispat (%)	Opak mineral (%)
1	59.4	15.7	9.0	13.5	2.8
2	54.8	2.6	8.4	32.7	1.8
3	51.1	10.8	2.0	33.1	0.5
4	53.5	1.6	2.2	33.8	1.1
5	55.0	16.7	5.3	21.4	0.7
6	53.9	21.2	4.5	18.0	1.5
7	55.2	17.0	6.3	19.1	1.8
8	56.5	4.9	13.4	23.6	1.6
9	50.4	13.2	0.3	34.3	1.0
10	58.8	12.2	3.3	23.3	0.7
11	63.0	11.4	12.7	11.9	1.6
12	46.6	26.0	1.0	25.0	0.9
13	69.0	4.0	2.0	29.9	8.4
14	61.4	3.1	1.9	25.0	6.8
15	73.8	2.9	0.1	23.1	3.7
16	69.0	7.4	0.1	17.8	0.5
17	58.1	7.6	0.5	22.9	0.4
18	70.1	6.9	0.6	17.8	0.3
19	79.0	5.2	0.6	17.1	0.4
20	60.3	20.1	3.1	15.8	6.6
21	52.7	3.6	1.2	40.3	1.9
22	59.7	6.5	4.6	27.6	4.0
23	58.1	12.9	9.1	19.1	1.9
24	60.8	16.3	4.1	17.5	3.8
25	56.2	6.8	0.2	34.6	1.0
26	60.5	8.8	0.1	28.6	0.9
27	61.3	9.6	0.1	26.1	1.3
28	64.8	8.9	0.5	24.9	1.1
29	67.0	4.8	1.3	18.2	1.5
30	66.1	5.6	0.2	20.0	2.5
31	69.4	4.4	0.7	17.9	2.5
32	69.5	5.1	0.7	19.8	5.0
33	65.6	3.7	3.5	21.8	4.6
34	64.7	10.9	3.8	19.3	1.1
35	61.9	10.0	4.0	19.0	1.4

ile belirlenen ortoklazların büyük çoğunlukla felsitik hamur içerisinde dağıldığını işaret etmektedir. Oransal olarak XRD deteksiyon limitlerinin altında kalan opak mineraller petrografik çalışmalarda gözlenmiş, ayrıca bazı

minerallerin (örneğin amfibol) yer yer opaklaştığı da belirlenmiştir (Şekil 5). Bunlara ek olarak, petrografik çalışmalar sırasında ölçülmüş Feret çapları ve minerallerin çevre uzunlukları Çizelge 3'te sunulmuştur.



Şekil 5. Mekanik deneyler öncesinde elde edilen ince kesit üzerinde plajiyoklaz ve opaklaşmış amfibollerin görünümü a) tek nikol b) çift nikol görüntüsü.

Figure 5. General views of plagioclase and opacified amphiboles on thin sections prepared prior to mechanical tests a) parallel nicols b) cross nicols.

Çizelge 3. Çalışılan kayaları oluşturan ana mineral bileşenlerine ait ortalama Feret çapları ve ortalama çevre uzunlukları.

Table 3. Average Feret's diameters and mean perimeters of main constitutive minerals constituting the studied rocks.

Örnek Nu.	Ortalama Feret çapı (mm)				Ortalama çevre uzunluğu (mm)			
	Amfibol	Biyotit	Plajiyoklaz feldspat	Opak min.	Amfibol	Biyotit	Plajiyoklaz feldspat	Opak min.
1	0.55	0.21	0.66	0.39	1.45	0.74	1.74	1.08
2	0.34	0.33	0.48	0.44	0.86	1.20	1.30	1.15
3	0.45	0.20	0.51	0.25	1.13	1.20	1.37	0.65
4	0.32	0.37	0.62	0.23	0.83	1.36	1.67	0.56
5	0.43	0.70	0.57	0.51	1.05	1.58	1.65	1.44
6	0.50	0.56	0.96	0.36	1.26	1.33	2.61	0.82
7	0.38	0.58	0.59	0.55	0.95	1.40	1.70	1.57
8	0.39	0.61	0.72	0.44	1.01	1.18	1.94	1.17
9	0.36	0.25	0.52	0.18	0.89	1.29	1.42	0.49

Ündül, Aysal

Çizelge 3. (devamı)

Table 3. (cont'd.)

Örnek Nu.	Ortalama Feret çapı (mm)				Ortalama çevre uzunluğu (mm)			
	Amfibol	Biyotit	Plajiyoklaz feldspat	Opak min.	Amfibol	Biyotit	Plajiyoklaz feldspat	Opak min.
11	0.32	0.21	0.49	0.22	0.80	1.31	1.33	0.64
12	0.34	0.20	0.57	0.19	0.85	0.74	1.51	0.53
13	0.43	0.39	0.68	0.45	1.04	1.06	1.90	1.13
14	0.39	0.72	0.63	0.34	0.94	1.83	1.68	0.85
15	0.39	0.28	0.79	0.37	0.97	0.57	2.00	0.94
16	0.37	0.41	0.56	0.27	0.95	0.82	1.50	0.75
17	0.49	0.40	0.60	0.24	1.17	0.5	1.67	0.67
18	0.45	0.48	0.64	0.30	1.11	1.24	1.77	0.80
19	0.35	0.48	0.54	0.26	0.86	0.92	1.44	0.67
20	0.43	0.37	0.46	0.37	1.03	0.91	1.25	0.94
21	0.36	0.25	0.58	0.28	0.89	1.08	1.56	0.71
22	0.45	0.48	0.38	0.35	1.16	1.11	1.18	0.87
23	0.35	0.24	0.49	0.24	0.88	1.26	1.35	0.59
24	0.31	0.46	0.64	0.23	0.77	1.51	1.71	0.59
25	0.30	0.28	0.46	0.21	0.75	0.80	1.21	0.39
26	0.29	0.19	0.37	0.19	0.75	0.40	0.98	0.35
27	0.31	0.18	0.32	0.20	0.78	0.35	0.85	0.44
28	0.28	0.19	0.32	0.18	0.73	0.80	0.86	0.36
29	0.58	0.67	0.54	0.22	1.47	2.24	1.44	0.58
30	0.46	0.75	0.51	0.28	1.17	2.33	1.35	0.76
31	0.63	0.52	0.60	0.35	1.57	1.94	1.61	0.95
32	0.67	0.71	0.66	0.29	1.60	2.08	1.73	0.79
33	0.34	0.49	0.65	0.36	0.85	2.48	1.83	0.91
34	0.29	0.24	0.66	0.23	0.73	2.17	1.70	0.62
35	0.37	0.81	0.54	0.32	0.91	1.64	1.65	0.88

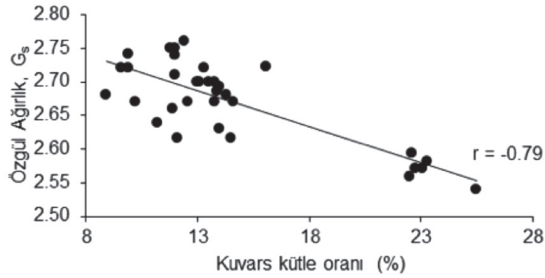
Çizelge 4. Çalışılan kayaların fiziksel ve mekanik özellikleri.
Table 4. The physical and mechanical properties of the studied rocks.

Örnek Nu.	LOI	G_s	n_t	γ (kN/m ³)	V_p (km/s)	E (GPa)	ν (-)	σ_{maks} (MPa)	$\sigma_{CI, hacim}$ (MPa)	$\sigma_{CI, çap}$ (MPa)
1	0.44	2.70	5.57	25.5	4.99	-	-	108	-	52
2	0.49	2.70	5.42	25.5	4.59	-	-	158	-	-
3	0.53	2.70	4.72	25.7	4.83	57.0	0.25	272	126	127
4	0.62	2.72	5.43	25.7	5.12	53.5	0.24	217	107	101
5	2.35	2.66	5.51	25.1	3.83	33.9	0.22	200	78	79
6	2.45	2.64	5.97	24.8	3.64	29.4	0.21	135	74	71
7	2.57	2.62	5.12	24.8	3.34	30.8	0.20	154	71	71
8	2.70	2.67	7.61	24.7	3.60	27.0	0.20	102	47	46
9	1.40	2.62	1.77	25.7	4.74	53.4	0.17	238	109	101
10	1.49	2.68	4.29	25.6	4.45	51.2	0.15	154	76	73
11	1.35	2.67	3.56	25.7	4.45	48.7	0.15	148	62	63
12	1.57	2.63	2.44	25.6	4.89	56.2	0.25	289	130	129
13	2.02	2.68	5.80	25.2	4.53	38.6	0.14	169	91	68
14	1.63	2.72	7.56	25.1	4.52	39.4	0.15	123	54	53
15	1.88	2.72	7.55	25.1	4.41	40.3	0.16	124	55	54
16	2.11	2.57	0.84	25.5	4.59	42.8	0.18	233	107	109
17	2.07	2.56	0.29	25.5	4.96	43.5	0.22	231	112	106
18	2.13	2.59	1.88	25.4	4.66	42.0	0.18	229	110	100
19	2.15	2.57	0.66	25.5	4.72	44.8	0.14	242	117	112
20	0.72	2.71	6.62	25.3	4.42	37.6	0.17	151	74	70
21	0.76	2.75	7.63	25.4	4.56	40.3	0.2	162	74	73
22	0.77	2.75	8.52	25.2	4.29	38.3	0.18	153	69	69
23	0.79	2.76	8.28	25.3	4.34	39.3	0.17	144	71	68
24	0.90	2.74	7.36	25.4	4.34	41.3	0.18	160	70	65
25	1.30	2.69	5.37	25.5	4.74	49.0	0.16	247	101	100
26	1.17	2.70	6.17	25.3	4.93	44.5	0.21	237	107	102
27	1.44	2.74	7.48	25.4	4.83	43.8	0.17	153	65	62
28	1.14	2.69	5.14	25.5	4.85	45.0	0.16	189	84	83
29	2.06	2.58	2.81	25.1	4.35	41.6	0.18	195	84	84
30	1.11	2.54	3.67	24.5	4.33	38.0	0.20	180	79	81
31	1.54	2.56	2.93	24.9	4.16	39.8	0.16	167	77	72
32	2.09	2.54	1.93	24.9	4.58	41.7	0.20	205	90	91
33	1.51	2.67	5.51	25.2	3.80	31.8	0.17	137	61	62
34	1.77	2.72	6.81	25.4	4.60	42.6	0.15	151	67	57
35	2.92	2.67	6.15	25.1	3.97	27.4	0.16	102	49	48

G_s : Özgül ağırlık, n_t : toplam porozite, γ : birim hacim ağırlık; E: Young Modülü; ν : Poisson oranı; s_{maks} : en yüksek dayanım; $\sigma_{CI, hacim}$: Brace vd. (1966)'ya göre tespit edilen çatlaklanma başlangıcı gerilme değeri; $\sigma_{CI, çap}$: Lajtai (1974)'e göre tespit edilen çatlaklanma başlangıcı gerilme değeri

Fiziksel Özelliklerdeki Değişimler

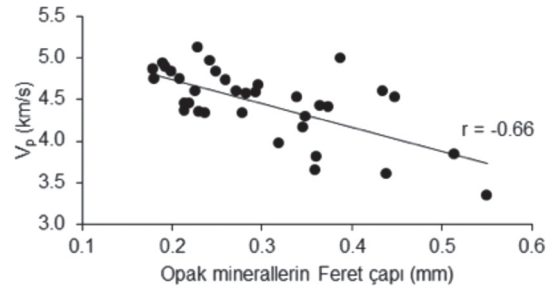
Çalışılan kayalara ait fiziksel özellikler toplu olarak Çizelge 4'te verilmiştir. Kuvars, magnetit ve biyotit minerallerinin kütlece oranının özgül ağırlığı önemli derecede değiştirdiği belirlenmiş ve Çizelge 5'teki eşitliklerde sunulmuştur. Magnetit ve biyotitin kütle oranlarındaki artışın özgül ağırlıkta artış meydana getirdiği, kuvarsin kütlece oranının ise özgül ağırlığı düşürdüğü görülmektedir (Şekil 6, Çizelge 5). Bu durum, magnetit ve biyotitin özgül ağırlıklarının içinde buldukları kayayı oluşturan diğer minerallerden nispeten yüksek olması, kuvarsin ise daha düşük özgül ağırlığı olması ile açıklanabilir. Sayısal mineralojik bulgular ile özgül ağırlık arasındaki ilişkilere benzer bir ilişki, sayısal petrografik özellikler (Örneğin, minerallerin alansal dağılımı, boyutları vb.) ile özgül ağırlık arasında tespit edilememiştir.



Şekil 6. Kuvars kütle oranı ile özgül ağırlığın değişimi.
Figure 6. The change of specific gravity with mass fraction of quartz.

Schon (1996) ve Barton (2007), P-dalga hızının artan porozite ile azaldığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada, porozite ile P-dalga hızı arasında bir ilişki tespit edilememiştir. Tandon ve Gupta (2013) de benzer şekilde bir ilişki bulamadıklarını ifade etmektedirler. Ancak bu çalışmada, sayısal petrografik veriler ve fiziksel özellikler arasındaki analizler sırasında,

P-dalga hızının, opak minerallerin ve biyotitlerin Feret çaplarının artmasıyla azaldığı gözlenmiştir. Korelasyon katsayısı yüksek olmasa da P-dalga hızındaki azalma eğilimi belirgindir (Şekil 7 ve Çizelge 5). Benzer bir ilişki opak minerallerin çevre uzunluklarıyla da tespit edilmiştir (Çizelge 5).



Şekil 7. Opak minerallerin Feret çapı ile kaya örneklerinin P-dalga hızları arasındaki ilişki.

Figure 7. The relation between the Feret's diameter of opaque minerals and the P-wave velocities of rock specimens.

Çizelge 5. Çalışılan kayalarda fiziko-mekanik ve petrografik özellikler arasındaki ampirik eşitlikler.

Table 5. Empirical equations between physico-mechanical and petrographical properties of the studied rocks.

Formül	r
$G_s = -0.0107M_k + 2.8255$	-0.79
$G_s = 0.0458M_{mag} + 2.5820$	0.68
$G_s = 0.0449M_{bio} + 2.6021$	0.63
$V_p = 0.0462M_{plj} + 2.6147$	0.69
$V_p = 0.0484M_{felds} + 1.4664$	0.67
$V_p = -2.8861F_{opa} + 5.3214$	-0.66
$V_p = -0.9441P_{opa} + 5.1855$	-0.65
$V_p = -1.3182F_{bio} + 4.9994$	-0.60
$LOI = -0.0814M_{felds} + 6.5564$	-0.70
$LOI = -0.0677M_{plj} + 4.2314$	-0.63
$LOI = -0.4856M_{mag} + 2.483$	-0.63
$LOI = -0.3724M_{bio} + 2.0915$	-0.46

Çizelge 5. (devamı)

Table 5. (cont'd.)

Formül	r
$LOI = -0.0671C_{plg.} + 3.0915$	-0.64
$UCS = 5.2455M_k + 102.36$	0.47
$UCS = -13.531n_i + 246.23$	-0.64
$UCS = 97.058(C_{plj} + C_{Amf})/C_{GrM} + 125.12$	0.37
$UCS = 219.75(C_{plj} + C_{Amf})/C_{GrM}^I + 35.758$	0.76
$UCS = -7.5966C_b + 202.93$	-0.56
$v = 0.0882(C_{plj} + C_{Amf})/C_{GrM} + 0.134$	0.56
$v = 0.1191(C_{plj} + C_{Amf})/C_{GrM}^I + 0.1099$	0.66
$v = 0.3047(C_{plj} + C_{Amf})/C_{GrM}^2 + 0.0709$	0.87
$v = -0.0026C_{GrM} + 0.3406$	-0.62
$v = -0.0038C_{GrM}^I + 0.4078$	-0.72
$v = -0.0038C_{GrM}^2 + 0.444$	-0.88
$E = -6.6561LOI + 52.326$	-0.55
$E = -57.69F_{opa.} + 58.573$	-0.72
$E = -18.502P_{opa.} + 55.578$	-0.69
$E = -26.325F_{bio.} + 52.743$	-0.66
$E = 106.78Ang_{opa.} + 36.92$	0.63
$\sigma_{Cl, hacim} = 0.46UCS^3$	0.97
$\sigma_{Cl, çap} = 0.44UCS^4$	0.97

¹ Andezit bileşimli örneklerden elde edilen değer

² Riyodasit bileşimli örneklerden elde edilen değer

³ Brace vd. (1966) tarafından önerilen yönteme göre bulunan değer

⁴ Lajtai (1974) tarafından önerilen yönteme göre bulunan değer

r = Korelasyon katsayısı

$C_{amf.}$ = Amfibol mineralinin alansal dağılımı

C_{GrM} = Tüm kaya tipleri için hamur malzemesinin alansal dağılımı

$C_{plj.}$ = Plajiyoklazın alansal dağılımı

$Ang_{opa.}$ = Opak minerallerin köşeliliği

$F_{opa.}$ = Opak minerallerin Feret çapı

$F_{bio.}$ = Biotitin Feret çapı

$M_{bio.}$ = Biotit minerali kütlece oranı

M_{Felds} = Feldspat minerali minerali kütlece oranı (Tablo 1'de verilen ortoklaz ve plajiyoklazların kütlece oranlarının toplamı)

$M_{mag.}$ = Magnetit minerali kütlece oranı

$M_{plg.}$ = Plajiyoklaz minerali kütlece oranı

M_k = Kuvars minerali kütlece oranı

n_i : Toplam porozite

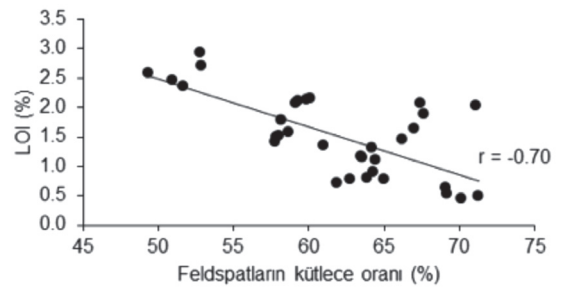
$P_{opa.}$ = Opak minerallerin çevre uzunluğu

$\sigma_{CP hacim}$: bkz. Çizelge 4

$\sigma_{CP çap}$: bkz. Çizelge 4

Bu çizelgede alansal dağılım ve kütlece oran olarak ana bileşenlerin etkileri sunulmuştur.

Ateşte kızdırma kaybı (LOI) değerleri kayaların fiziksel özelliklerinin ve ayrışma durumunun belirlenmesinde kullanılan önemli bir özelliktir (Arıkan vd., 2007; Ündül ve Tuğrul, 2012). Çalışılan kayalarda nispeten düşük LOI değerleri kayaların taze, az ayrışmış seviyelere ait olduğunu kanıtlamaktadır. Sayısal mineralojik çalışmaların sonuçlarına göre feldspat mineralleri (ortoklaz ve plajiyoklaz) ve magnetitin kütlece oranları, LOI değerlerini etkilemektedir. Buna ek olarak, plajiyoklaz mineralinin alansal dağılımının LOI'ye etki eden tek sayısal petrografik bileşen olduğu görülmüştür (Şekil 8 ve Çizelge 5). Örneklemeler taze ve az ayrışmış seviyelerde yapılmış olsa bile, petrografik çalışmalarda bazı minerallerin daha fazla altere oldukları, hatta zonlu plajiyoklazların Ca'ca zengin olan zonlarının, Na'ca zengin olan zonlarına oranla daha fazla altere olduğu gözlenmiştir. Kayaları oluşturan ana mineraller içerisinde plajiyoklazların ve kısmen de hamur içerisindeki ortoklazların, alterasyona en yatkın mineral grubu oldukları için LOI'ye etkisi en yüksek seviyede olmaktadır.



Şekil 8. Feldspatların kütlece oranı ile LOI arasındaki ilişki.

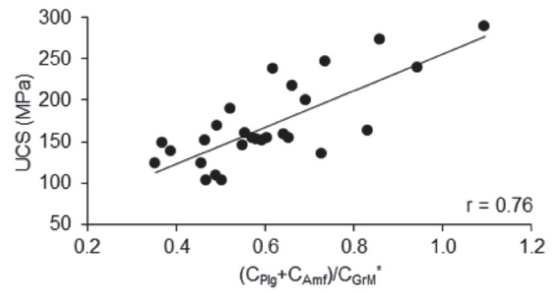
Figure 8. The relation between mass fractions of feldspars and LOI.

Tek Eksenli Deney Sonuçlarının Mineralojik ve Petrografik Özellikler İle Yorumlanması

Çalışılan kayaların tek eksenli sıkışma dayanımları 102 – 289 MPa arasında değişmektedir (Çizelge 4). Kaya içerisindeki akışkanların dolaşımını ve kayanın dayanımını yakından etkilediği düşünülen porozitenin, çalışılan kayaların tek eksenli sıkışma dayanımına etkileri bu çalışmada değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, artan porozite ile dayanımın düştüğünü göstermektedir. Benzer ilişkiler Ulusay vd. (1994) ve Baud vd. (2014) tarafından da ifade edilmiştir (Çizelge 5).

Bu çalışmaya konu olan kayalar içerisinde andezit bileşimli örneklerde, plajiyoklaz ve amfibolün alansal toplamalarının hamur malzemesine oranlarının, tek eksenli sıkışma dayanımına etki ettiği Şekil 9 ve Çizelge 5'te gösterilmektedir. Çalışılan kayalar için heterojenliği oluşturan unsur hamur içerisine dağılmış fenokristallerin alansal dağılımları ile hamur malzemesinin alansal dağılımının arasındaki oran ile açıklanmaktadır. Riyodasit bileşimli kayaların heterojenlik seviyeleri ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında bir ilişki tespit edilememiştir. Bu durum, riyodasit örneklerinde, hamur malzemesinin çok daha yüksek oranlarda bulunmasından kaynaklanmaktadır. Kayanın dayanımını etkileyecek iri fenokristaller ile

hamur malzemesi arasındaki orana ait kritik sınıır bu çalışmada tespit edilemese de, andezit bileşimli örneklerdeki değişim dikkat çekicidir (Şekil 9 ve Çizelge 5). Elde edilen bu sonuçlar dayanımın önemli ölçüde bu parametrelerden etkilendiğini göstermektedir. Şekil 9'da gösterildiği gibi andezit bileşimli örneklerde, fenokristallerin artışının tek eksenli sıkışma dayanımını artırdığı belirgindir. Bu durum, plajiyoklaz ve amfibol fenokristallerine ait elastik özelliklerin, hamur malzemesini oluşturan minerallerin (Örneğin, ortoklaz, kil mineralleri vd.) elastik özelliklerinden daha yüksek olması ile açıklanabilir (Ündül vd., 2015 ve Çizelge 6).



Şekil 9. Ana bileşenlerin tek eksenli sıkışma dayanımına etkileri (grafikte andezit bileşimli kayalara ait verilerin sunulduğuna dikkat edilmelidir. Kısaltmalar için Çizelge 5'teki açıklamalara bakınız).

Figure 9. Effects of major constituents on uniaxial compressive strength (note that only the data of rock specimens of andesitic compositions are plotted. For abbreviations, please refer to Table 5).

Çizelge 6. Minerallerin elastik modülleri ve Mohs sertlikleri.

Table 6. Elastic modulus and Mohs values of minerals.

	Amfibol	Biyotit	Ortoklaz	Plajiyoklaz	Kuvars
E (GPa) ¹	118-128	63-64	73-74	81-106	91-105
Mohs sertlik	5-6	2.5-3	6	6-6.5	7

¹ Veriler Prodaivoda et vd. (2004)'ten alınmıştır.

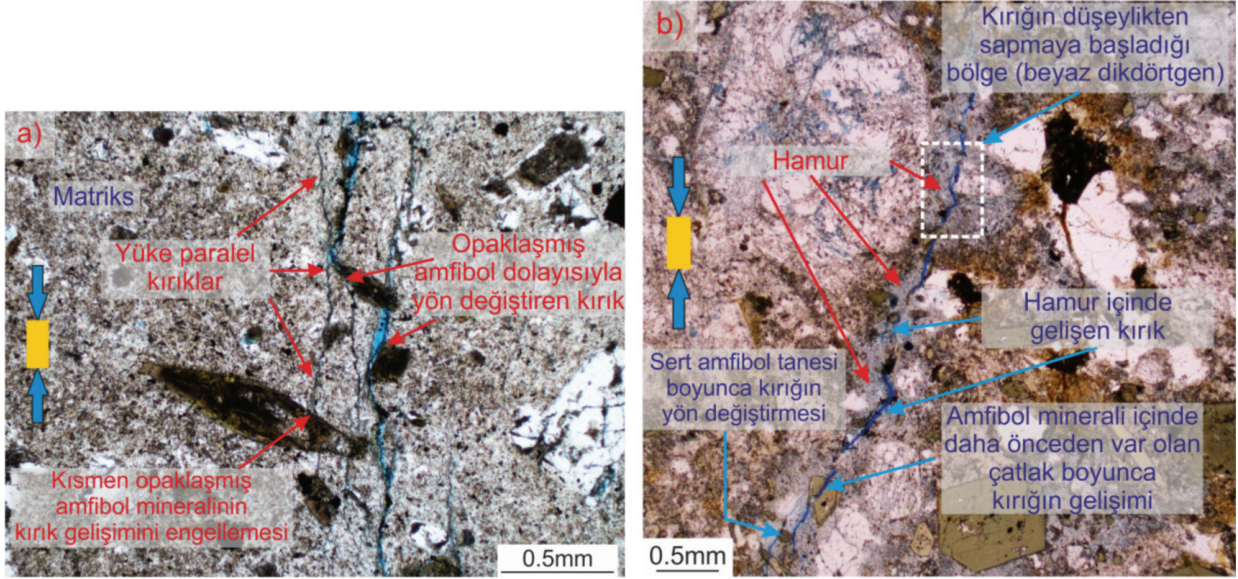
Kuvars miktarının artmasıyla tek eksenli sıkışma dayanımının artacağı farklı araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir (Örneğin Zorlu vd., 2004; Tandon ve Gupta, 2013). Bu çalışmada, kuvars kütle oranı ile tek eksenli sıkışma dayanımı arasında oldukça zayıf bir ilişki tespit edilmiştir (Çizelge 5). Kuvarsların alansal dağılımları ile dayanım arasında ise bir ilişki tespit edilememiştir. Ulusay vd. (1994), kuvars içeriği ile dayanım arasında benzer şekilde zayıf ilişkilerden bahsetmiştir. Diğer yandan, bu çalışmada, biyotitin tek eksenli sıkışma dayanımına etkisinin, diğer minerallere göre daha yüksek oranda olduğu belirlenmiştir. Korelasyon katsayısı düşük olmakla beraber, biyotit fenokristallerinin artmasıyla tek eksenli sıkışma dayanımının düştüğü basit regresyon analizlerinde görülmektedir (Çizelge 5). Biyotitin, kaya dayanımına ve yenilmesine etkisi Mahabadi vd. (2012), Nicksiar ve Martin (2013a) ve Ündül vd. (2015) tarafından da ifade edilmektedir.

Tek Eksenli Gerilmeler Altında Çatlak Gelişimi

Tek eksenli gerilmeler altında iki önemli mikro yapısal özellik, kaya içinde çatlak gelişmesi ile ilgili olarak ön plana çıkmaktadır. Bunlar fenokristaller ve hamur malzemesinin kaya içerisindeki dağılımlarıdır. Çatlak gelişimi Griffith (1924) kırılma teorisine göre, gelen yüke paralel şekilde gelişme eğilimindedir. Ancak gerilmeler ile oluşan çatlak, kaya içerisinde heterojen herhangi bir unsura ulaştığı zaman,

bulduğu ortamın ve karşılaştığı unsurun elastik özelliklerine göre yön değiştirebilir. Karşılaşılan unsur içerisinde kayanın oluşumundan ve/veya tektonik geçmişinden kaynaklanan çatlaklar var ise bu zayıflık düzlemleri boyunca da çatlak gelişimi devam edebilmektedir (Amann vd., 2014; Ündül vd., 2015). Gerilme artışıyla, gelişen çatlakların daha yüksek elastik özellikler gösteren unsurları keşbildiği de gözlenmiştir (Amann vd., 2014).

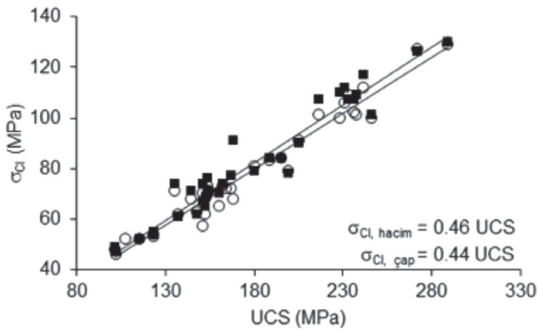
Çalışmaya konu olan kayalar içerisinde, riyodasit bileşimli örneklerde yüklemeye yönüne paralel çatlaklar, andezit bileşimli örneklere oranla daha belirgindir. Hamur malzemesinin daha fazla olduğu bu tip örneklerde, çatlak gelişimi eksenel yüke 0-5° açılarda gelişmektedir (Şekil 10a). Andezit bileşimli örneklerde ise daha fazla alana yayılmış fenokristallerden dolayı, gelişen çatlaklar yüke paralel gelişimini sürdürememektedir. Hamur malzemesinin genel elastik özelliklerinden daha yüksek elastik özelliklere sahip fenokristaller yüke paralel kırık gelişimini engellemektedir. Bu durumda, kırıklar mineral çevrelerini dolaşacak şekilde sınır çatlakları olarak gelişmektedir (Şekil 10b). Benzer bir durum Ündül vd. (2015) tarafından da belirtilmiştir. Çatlakların paralellikten sapması, çatlakların birbirleriyle bir araya gelip kararsız çatlak gelişimini artırmamasını geciktirmektedir. Böylece, kayanın yenilmesi daha yüksek gerilme değerlerinde gerçekleşmektedir. Bu durum, fenokristallerin artmasıyla tek eksenli sıkışma dayanımının artması arasındaki ilişkiyi de destekleyici yöndedir.



Şekil 10. Çatlak gelişiminin a) riyodasit bileşimli bir örnekte gelişimi, b) andezit bileşimli bir örnekte gelişimi.

Figure 10. Crack propagation a) in a specimen of rhyodacite composition b) in a specimen of andesitic composition.

Çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyeleri, yöntem kısmında ifade edildiği haliyle, iki farklı yöntem ile hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara göre çalışılan kayalarda çatlaklanma başlangıcı tek eksenli sıkışma dayanımının % 44-46'sı seviyelerinde başlamaktadır (Şekil 11). Nicksiar ve Martin (2013a), mağmatik kökenli kayalar için benzer bir oranı tespit etmiştir.

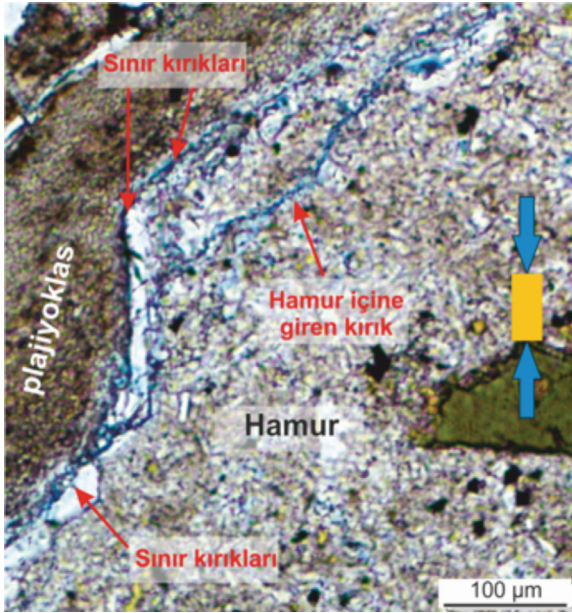


Şekil 11. Tek eksenli sıkışma dayanımı ile farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerinin ilişkisi.

Figure 11. The relationship between uniaxial compressive strength and the crack initiation stress levels obtained from two different methods.

Çatlak Gelişimine Minerallerin Tekil Etkileri Plajiyoklazların Etkisi

Plajiyoklaz minerallerinin bulunduğu noktalarda, eksenel yüklere bağlı, tane sınırı kırıkları ve tane içi kırıklar gözlenmektedir. Tane içi kırıkların, plajiyoklazın içerisinde daha önceden oluşan kırıklar (dilinin düzlemleri) boyunca geliştiği ve bu kırıkların tane içinde birleşmediği gözlenmiş, kırıkların plajiyoklaz minerallerinin sınırlarından hamurun içerisine doğru yöneldiği belirlenmiştir. Bu durum, plajiyoklazların elastik modül değerlerinin, hamur malzemesinin elastik modülünden daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Şekil 12).

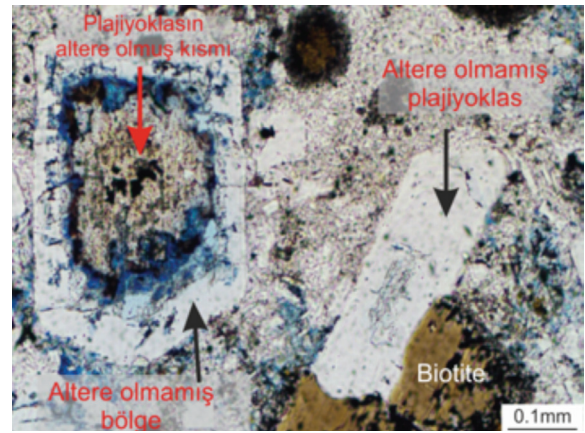


Şekil 12. Plajiyoklaz minerali ile hamur malzemesi sınırı boyunca sınır kırıklarının gelişimi ve kırığın hamur içerisine doğru gelişimini gösteren ince kesit görüntüsü.

Figure 12. A photomicrograph showing propagation of boundary cracks along the border of plagioclase and groundmass, and propagation of the crack within the groundmass.

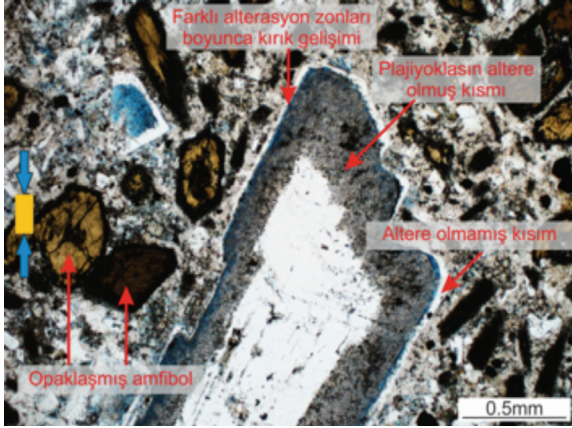
Diğer yandan altere olmuş plajiyoklazların kırık gelişimine etkileri Åkesson vd. (2004) tarafından tartışılmıştır. Araştırmacılar, kırık gelişiminde alterasyonun, ikizlenme düzlemlerinden daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Çalışılan kayaları oluşturan ana bileşenlerden plajiyoklazların alterasyon ile kırık gelişimine etkileri Şekil 13'te ve 14'te verilmiştir. Önemli miktarda plajiyoklaz tanesinde, iç kısımlarının anortit veya andezin bileşimli, dış kısımlarının ise albit bileşiminde olmasından dolayı orta kısımlarında killeşme

gözlenmiş, dış kısımlarının ise altere olmadan taze olarak korunduğu görülmüştür (Şekil 13). Ayrıca Şekil 13'te görüldüğü gibi, Ca'ca zengin zonda karbonatlaşma ve kaolinitik alterasyon egemenken, hemen yanında daha az Ca içeren oligoklaz – andezin bileşimli plajiyoklazda alterasyon gelişmemiştir. Bu iki farklı alterasyon zonuna ait sınırlar, farklı elastik özelliklerin sınırı olmasından dolayı, tane içi kırıkların gelişiminin gözlemlendiği alanlardır (Şekil 13 ve Şekil 14).



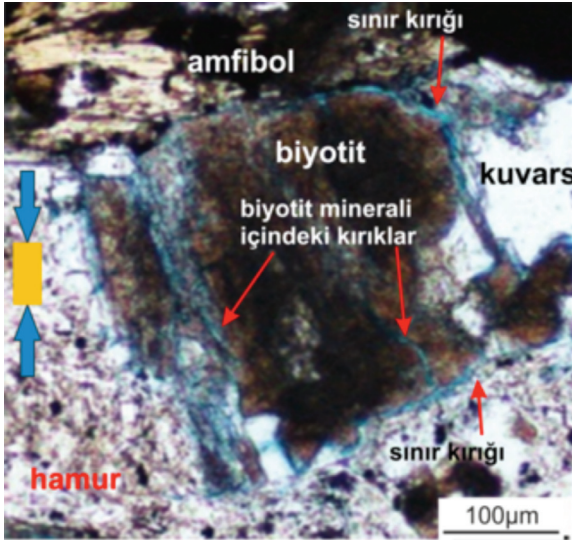
Şekil 13. Gerilmelere bağlı gelişen çatlakların kısmen altere olmuş plajiyoklaz örneğinde görünümü (Plajiyoklaz tanesinin orta kısmı anortik – andezin bileşiminde, dış kısmı ise albit bileşimindedir. Bu durumda alterasyon iç kısımlardan başlayıp daha dayanımlı dış kısımlara doğru ilerlemektedir. Çatlak altere olmuş ve olmamış kesimin sınırı boyunca devam etmektedir (Ündül, 2016'dan değiştirilerek)).

Figure 13. A view of stress induced cracks in a partially altered plagioclase (The central part of the plagioclase grain is in the composition of anorthic-andesine, the outer part is in albite composition. In this situation, the alteration starts from the central part to the outer sections. The crack is generated within this boundary of altered and unaltered sections (modified from Ündül, 2016)).



Şekil 14. Opaklaşmış amfibole ve plajiyoklaz tanesinde alterasyon zonuna ait mikroskop görüntüsü (Plajiyoklaz tanesinde altere olmuş ve altere olmayan kesim arasında elastik özellik değişiminden dolayı gelişebilen kırık mavi renk ile gösterilmektedir).

Figure 14. A photomicrograph of opacified amphibole and an alteration zone in plagioclase (The crack propagating along the altered and unaltered sections is given by blue dye).



Şekil 15. Tek eksenli yükler altında biyotit minerali içinde ve biyotit tanesi sınırlarında gelişen kırıkların ince kesit görüntüsü.

Figure 15. A photomicrograph showing the cracks propagated under uniaxial loads along the boundaries and within a biotite grain.

Biyotitlerin Etkisi

Biyotitlerin çatlak başlangıcı ve kırık gelişimine etkileri Brace vd. (1972) tarafından ifade edilmiştir. Benzer şekilde Chen vd. (2004), sayısal simülasyonlar ile biyotitin muhtemel etkilerini varsayımsal olarak ortaya koymuşlardır. Bu çalışmaların yanında, Mahabadi vd. (2012), gerilme altındaki kaya örneğinin sayısal modellemesi çalışmalarında, gerilme dağılımına, çatlak oluşumuna ve kırık gelişimine etkiyen en zayıf bileşenin, biyotitler olabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan kayaların ana bileşenleri içerisinde tek başına kaya dayanımına en fazla etkiyen mineral, biyotit olarak tespit edilmiştir (Çizelge 5). Çalışılan kayalar içerisinde biyotit oranı nispeten düşük olsa da, ana bileşen mineraller incelendiğinde kaya dayanımına doğrudan etkiyen tek mineralin biyotit olmasından dolayı bu sonuç dikkat çekicidir. Biyotitlerin özellikle dilinim düzlemlerine paralel yönde daha kolay kırıldıkları ve kırık düzlemlerinin dilinimleri takip ettiği görülür. Dilinimlere dik yönde ise biyotit için maksimum mukavemet görülmekte ve kırık biyotit mineralinin etrafından devam etmektedir. Ayrıca yersel olarak kloritleşme ve opaklaşma etkisiyle de farklı davranışların olduğu görülmektedir.

Amfibollerin Etkisi

İnce kesit çalışmalarında, amfibol minerallerinin bulunduğu kesimlerdeki kırık gelişiminin, plajiyoklazlardakine benzer şekilde gerçekleştiği görülmüştür. Gerilmeye bağlı kırıklar amfibol mineralindeki önceden mevcut olan kırık-çatlaklar (dilinimleri) boyunca tane içine girebilmektedir. Amfibollerin opaklaşmış

örneklerinde de benzer bir şekilde, kırıklar sadece var olan mevcut kırıklar ile tane içine doğru ilerlemekte, aksi takdirde yön değiştirip sınıır kırığı olarak devam etmektedir (Şekil 10a ve b).

Hamur Malzemesinin Etkisi

Onodera ve Asoka (1980), Tuğrul ve Zarif (1999) ve Yılmaz vd. (2011) kaya içerisinde ortoklazın artmasıyla UCS'nin azaldığını ifade etmişlerdir. Önceki çalışmalara göre, ortoklazların kırık gelişiminde ve kırıkların bir araya gelmelerinde önemli etkileri olduğu görülmektedir. Çizelge 1'de ve önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde ifade edildiği üzere bu çalışmada değerlendirilen kayalarda ortoklaz, hamur malzemesi içindeki en önemli bileşenlerdendir. Hamur içerisinde diğer bileşenlere göre daha fazla bulunan ortoklaz, minerali hamur malzemesinin genel elastik özelliğini göreceli olarak düşürmektedir (Çizelge 6). Bu sebeple, hamur malzemesinin, diğer ana minerallerden daha düşük elastik özellikler göstermesi, gerilmeler altında gelişen kırıkların hamur içerisine doğru gelişmesini açıklamaktadır (Şekil 10 ve 12). Hamurun ufak taneli (felsitik) kuvars ve feldspatlardan oluşması ile camsı olması arasında da farklı davranışlar gözlenmektedir. Felsitik hamur genel olarak daha yüksek dayanımlı ve elastiklik özelliği fazla iken, camsı hamur veya hamurun camsı kesimlerinin daha gevrek olduğu ve kırılmaya daha yatkın olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, hamurun camsı kesimleri alterasyona karşı da daha duyarlı olup, felsitik hamura nazaran daha hızlı altere olurlar. Yine hamur içerisinde bulunan opak mineral taneleri hamurun fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

Elastik Özelliklerdeki Değişimler

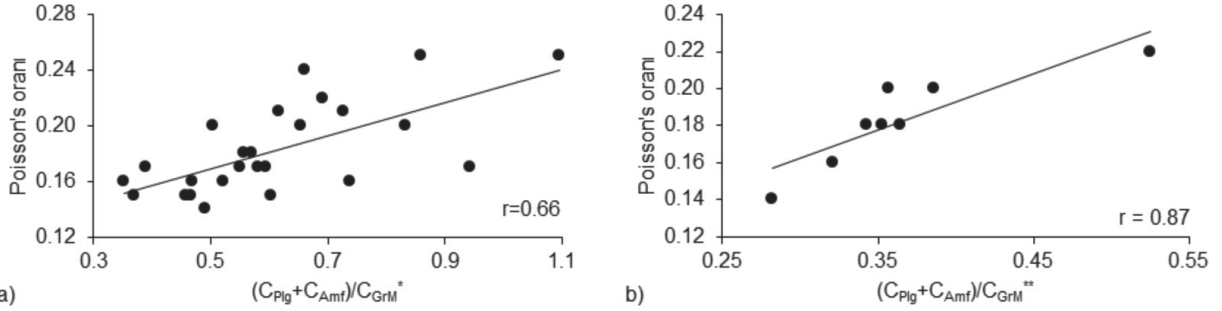
Young modülü ve Poisson oranı, kayaların jeomekanik davranışlarının belirlenmesinde kullanılan önemli mekanik parametrelerdendir (Gerçek, 2007; Hudson vd., 2011).

Çalışılan kayalar için, mineralojik, petrografik ve mekanik verilerin analizi; fenokristallerin ve hamur malzemesinin, Poisson oranını etkileyen temel parametreler olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun yanında, minerallerin kütlece oranları ile Poisson oranı arasında bir ilişki saptanamamıştır.

Hamur içeriğinin fenokristallere göre daha fazla olduğu kaya örneklerinde (örneğin riyodasit bileşimli örnekler) tek eksenli gerilme koşulları altında, kırıkların uygulanan yük doğrultusuna paralel olarak geliştiği gözlenmiştir (Şekil 10a). Bu paralellik kırığın heterojen bir unsur (örneğin bir fenokristal) ile karşılaşmasına kadar devam etmektedir. Kaya örneklerinin heterojenliği, içerdikleri fenokristallerin hamur malzemesine oranla artmasıyla yükselmektedir. Bu durum, özellikle andezit bileşimli kayalar için geçerlidir. Nispeten homojen bir dokuda kırıklar paralel olarak gelişirken, artan heterojenlik ile, uygulanan yüke paralel ve makaslama kırıkları beraber gelişmektedir. Böylece, Poisson oranı hamur malzemesinin artmasıyla azalmakta, fenokristallerin artmasıyla eksenel ve makaslama kırıklarının birlikte gelişmesinden dolayı artmaktadır (Ündül vd., 2015). Poisson oranındaki bu değişimler ile hamur malzemesi ve fenokristallerin alansal dağılımları arasındaki ilişkiler Şekil 16a ve 16b ile Çizelge 5'te sunulmuştur. Şekil 17 ise Poisson oranının, hamur malzemesi ve fenokristallerin alansal dağılımlarının oranlarına göre değişimini göstermektedir. Hamur malzemesinin Poisson

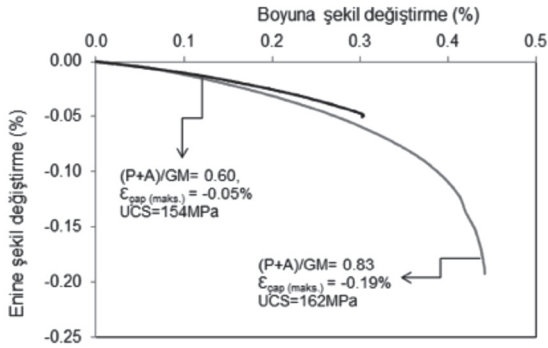
oranına tek başına etkisi, plajiyoklaz, amfibol ve hamur malzemesinin birlikte yapacağı etkiye göre daha yüksek seviyede olmaktadır (Çizelge 5).

Sayısal petrografik ve elastik özelliklerin birlikte değerlendirilmesi sonrasında, Young modülünün opak minerallerin artan tane boyu ve çevre uzunlukları ile azaldığı ortaya konmuştur



Şekil 16. Plajiyoklaz ve amfibollerin toplam alansal dağılımlarının hamur malzemesine oranı ile Poisson oranı arasındaki ilişkiler: a) andezitik bileşimdeki örnekler, b) riyodasit bileşimindeki örnekler.

Figure 16. The relation between Poisson ratio and the sum of areal distribution of plagioclase and amphibole: a) specimens of andesitic composition b) specimens of rhyodasitic composition.



Şekil 17. Yük altında enine ve boyuna şekil değiştirmelerin değişimi: a) hamur malzemesinin nispeten daha fazla olduğu örnek ((P + A) / GM = 0.60, $\epsilon_{rad}(\max) = -0.05\%$), b) fenokristallerin nispeten daha fazla olduğu örneğe ((P + A) / GM= 0.80, $\epsilon_{rad}(\max) = -0.19\%$).

Figure 17. Changes of axial and radial strains under stress: a) specimen with relatively higher groundmass content ((P + A) / GM = 0.60, $\epsilon_{rad}(\max) = -0.05\%$), b) specimen with relatively higher phenocryst content ((P + A) / GM= 0.80, $\epsilon_{rad}(\max) = -0.19\%$).

(Çizelge 5). Diğer yandan opak minerallerin küresel şekile yaklaşmaları Young modülünü artırmaktadır. Bu durum, nispeten zayıflamış opak mineralin küresel şekle yaklaşmasıyla, yani etrafında biriken gerilmeyi çevresine yaymasıyla açıklanabilir. Bunun yanı sıra, biyotitler, tek eksenli sıkışma dayanımında olduğu gibi Young modülüne de etki etmektedir. Biyotit minerallerinin boyutları büyüdükçe Young modülünde azalmalar gözlenmektedir (Çizelge 5).

SONUÇLAR

Andezit ve riyodasit bileşimli kayaların iç yapıları ile fiziksel, mekanik ve deformasyon özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- 1) Bölgedeki kayaların en yüksek dayanımları taze ve az ayrılmış seviyeler için 108-289 MPa arasında değişmektedir. Çatlaklanma

başlangıcı gerilme seviyeleri ise, tek eksenli sıkışma dayanımlarının yaklaşık % 44- % 46 seviyelerinde olduğu ortaya konmuştur.

- 2) Çalışılan kayaları oluşturan ana bileşenlerin kütlece oranları, özgül ağırlığı etkilemektedir.
- 3) Opak minerallerin ve biyotitin tane boylarındaki artışlar V_p 'nin düşmesine, feldspat minerallerinin kütlece oranındaki artışlar ise artmasına neden olmaktadır.
- 4) Feldspat minerallerinin kütlece oranlarının artması LOI'nin yüksek değerler almasına neden olmaktadır.
- 5) Minerallerin ve hamur malzemesinin alansal dağılımı ve porozite, UCS'i etkileyen ana unsurlardır. Bileşenlerin kütlece oranlarının UCS üzerinde bir etkisi gözlenmemiştir.
- 6) Fenokristaller ve hamur, çatlaklanma gelişimi için öne çıkan bileşenlerdir. Ayrıca fenokristallerin artması enine deformasyonu ve dolayısıyla Poisson oranını artırmaktadır. Hamur içeriğinin artmasıyla, genel olarak gerilme yönüne paralel kırıklar oluşmaktadır. Böylece Poisson oranı nispeten daha düşük değerler almaktadır.
- 7) Çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerinin ve tek eksenli sıkışma dayanımlarının hamur, plajiyoklaz ve amfibol fenokristallerinden etkilendiği belirgindir. Biyotitler ise ana bileşenler içindeki en zayıf bileşen olup, biyotit artışı ile σ_{CI} ve UCS azalmaktadır.
- 8) Young modülü değerleri biyotitin artan tane boyu ve artan LOI değeri ile azalmaktadır.
- 9) Opak ve altere mineraller σ_{CI} ve UCS'i etkilemektedir. Artan opak mineral miktarı ile UCS azalmaktadır. Minerallerin taze

oldukları durumda içlerinde kırık gelişimi gözlenmez iken opaklaşmış ve altere oldukları durumlarda aynı mineraller içerisinde kırıklar gelişebilmektedir.

- 10) Örneklerin tek eksenli gerilmeler altındaki yenilme süreçlerinde kırıklar genel olarak, hamur ve fenokristallerin sınırları boyunca gelişmekte ve artan gerilmeler ile hamur malzemesine doğru ilerlemektedir.
- 11) Fiziksel özelliklerdeki değişimler, sayısal mineralojik analizler ile tespit edilebilmektedir. Diğer yandan, petrografik araştırmalar (mineral türü ve miktarı, tane geometrisi, önceki çatlak ve kırıklar vb.) kayanın tek eksenli yükler altındaki davranışını belirlemede daha yararlıdır.
- 12) Taze ve altere olmuş minerallerin bir arada olması, kayaların oluşumlarından sonraki dönemlerde oluşmuş kırık ve çatlaklar, tekil olarak herbir mineralin σ_{CI} , UCS ve çatlaklanma gelişimi üzerindeki etkisinin tam olarak anlaşılmasını engellemekte ve basit regresyon analizlerinde düşük korelasyon katsayılarının bulunmasına neden olmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akartuna, M., 1950. Imroz Adasında bazı Jeolojik müşahadeler. Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni 2(2), 8–18.
- 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.
- Amann, F., Button, E. A., Evans, K. F., Gischig, V. S., Blümel, M., 2011. Experimental study of

- the brittle behavior of clay shale in shortterm unconfined compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 44 (4), 415–430.
- Amann, F., Ündül, Ö., Kaiser, P., 2014. Crack initiation and crack propagation in heterogeneous sulfate rich clay rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47 (5), 1849–1865.
- ANON, 1995. The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, 207–242.
- Arıkan, 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.
- Barton, N., 2007. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. Taylor and Francis, London, 729 p.
- Baud, P., Wong, T. F., Zhu, W., 2014. Effects of porosity and crack density on the compressive strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 67, 202–211.
- Bieniawski, Z. T., 1967. Mechanism of brittle failure of rock part I—theory of fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 4 (4), 395–406.
- Brace, W. F., 1964. Brittle fracture of rocks. In: Judd, W.R. (Ed.), *State of Stress in the Earth's Crust: Proc., International Conference*, Santa Monica, Calif. American Elsevier Publishing Company, New York, 110–178 p.
- Brace, W. F., Paulding, B. R., Scholz, C., 1966. Dilatancy in fracture of crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 71 (16), 3939–3953.
- Brace, W. F., Silver, E., Hadley, K., Goetze, C., 1972. Cracks and pores: a closer look. *Science* 178 (4057), 162–164.
- Chen, S., Yue, Z. Q., Tham, L. G., 2004. Digital image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 939–957.
- Coggan, J. S., Stead, D., Howe, J. H., Faulks, C. I., 2013. Mineralogical controls on the engineering behavior of hydrothermally altered granites under uniaxial compression. *Engineering Geology*, 160, 89–102.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999. Effect of grain size on the initiation and propagation threshold of stress-induced brittle fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 32 (2), 81–99.
- Gerçek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 1–13.
- Griffith, A. A., 1924. Theory of rupture. *Proceedings of the First International Congress of Applied Mechanics: Delft*, 55–63 p.
- Gupta, V., Sharma, R., 2012. Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: a case study from northwestern Himalaya. *Engineering Geology*, 135–136, 1–9.
- Hatzor, Y. H., Palchik, V., 1997. The influence of grain size and porosity on crack initiation stress and critical flaw length in dolomites. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 34 (5), 805–816.
- Howarth, D. F., Rowlands, J. C., 1986. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*, 9 (4), 69–79.

- Hudson, J. A., Cosgrove, J. W., Kemppainen, K., Johansson, E., 2011. Faults in crystalline rock and the estimation of their mechanical properties at the Olkiluoto site, western Finland. *Engineering Geology*, 117, 246-258.
- ISRM, 2007. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. Kozan, Ankara, 1974–2006 p.
- Koral, H., Öztürk, H., Hanilçi, N., 2009. Tectonically induced coastal uplift mechanism of Gökçeada Island, Northern Aegean Sea, Turkey. *Quaternary International*, 197, 43–54.
- Lajtai, E. Z., 1974. Brittle fracture in compression. *International Journal of Fracture*, 10 (4), 525–536.
- Lan, H., Martin, C. D., Hu, B., 2010. Effect of heterogeneity of brittle rock on micromechanical extensile behavior during compression loading. *Journal of Geophysical Research*, 115, 1-14.
- Mahabadi, O. K., Randall, N. X., Zong, Z., Grasselli, G., 2012. A novel approach for microscale characterization and modeling of geomaterials incorporating actual material heterogeneity. *Geophysical Research Letters*, 39, 6 p.
- Martin, C. D., Chandler, N. A., 1994. The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 31 (6), 643–659.
- Moradian, Z., Einstein, H. H., Ballivy, G., 2016. Detection of Cracking Levels in Brittle Rocks by Parametric Analysis of the Acoustic Emission Signals. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (3), 785-800.
- Nicksiar, M., Martin, C. D., 2012. Evaluation of methods for determining crack initiation in compression tests on low-porosity rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45 (4), 607–617.
- Nicksiar, M., Martin, C. D., 2013a. Crack initiation stress in low porosity crystalline and sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 154, 64–76.
- Nicksiar, M., Martin, C. D., 2013b. Factors Affecting Crack Initiation in Low Porosity Crystalline Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 154, 64-76.
- Onodera, T. F., Asoka, K. H. M., 1980. Relation between texture and mechanical properties of crystalline rocks. *Bulletin of International Association for Engineering Geology*, 22, 173–177.
- Öztürk, C. A., Nasuf, E., Bilgin, N., 2004. The assessment of rock cutability, and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104 (7), 397–402.
- Přikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 38 (5), 671–682.
- Přikryl, R., 2006. Assessment of rock geomechanical quality by quantitative rock fabric coefficients: Limitations and possible source of misinterpretations. *Engineering Geology*, 87, 149–162.
- Prodaivoda, G. T., Maslov, B. P., Prodaivoda, T. G., 2004. Estimation of thermoelastic properties of rock-forming minerals. *Russian Geology and Geophysics*, 45 (3), 389-404.
- Räsänen, M., 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala–Iitti complex, southeastern Finland. *Engineering Geology*, 74, 197-211.

- Rasband, W. S., 2012. ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2012.
- Schon, J. H., 1996. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics. Elsevier, New York, 583 p.
- Tandon, R. S., Gupta, V., 2013. The control of mineral constituents and textural characteristics on the petrophysical & mechanical (PM) properties of different rocks of the Himalaya. *Engineering Geology*, 153, 125–143.
- Tapponnier, P., Brace, W. F., 1976. Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 13, 103–112.
- Temel, Ö., Çiftçi İ., 2002. Gelibolu Yarımadası, Gökçeada ve Bozcaada Tersiyer çökellerinin stratigrafisi ve ortamsal özellikleri. *TPJD Bulletin* 14 (2), 1740.
- Tuğrul, A., Zarif, I. H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. *Engineering Geology*, 51, 303–317.
- Ulusay, R., Tureli, K., Ider, M. H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 38 (1–2), 135–157.
- Ündül Ö., Amann F., Aysal, N., Plötze, M., 2015. Micro-Textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. *Engineering Geology*, DOI: 10.1016/j.enggeo.2015.04.024.
- Ündül, Ö., Tuğrul, A., 2012. The influence of weathering on the engineering properties of dunites. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45 (2), 225-239.
- Ündül, Ö., 2016. Assessment of mineralogical and petrographic factors affecting petro-physical properties, strength and cracking processes of volcanic rocks. *Engineering Geology*, 210, 10–22.
- Yeşiloğlu-Gültekin, N., Sezer, E. A., Gökçeoğlu, C., Bahyan, H., 2013. An application of adaptive neuro fuzzy inference system for estimating the uniaxial compressive strength of certain granitic rocks from their mineral contents. *Expert Systems with Applications*, 40 (3), 921–928.
- Yılmaz, N. G., Göktan, R.M., Kibici, Y., 2011. Relation between some quantitative petrographic characteristics and mechanical strength properties of granitic building stones. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 48 (3), 506–513.
- Zorlu, K., Ulusay, R., Ocakoğlu, F., Gökçeoğlu, C., Sönmez, H., 2004. Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41 (1), 93 – 98.