



Araştırma Makalesi / Research Article

## Bazaltik Kayaların Mineralojik ve Petrografik Özelliklerinin Akustik Emisyon Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

*Investigation of the Effects of Mineralogic and Petrographical Characteristics of Basaltic Rocks on Acoustic Emission*

Sinem ERİŞİŞ , Atiye TUĞRUL , Murat YILMAZ\* , Selman ER 

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 34320, Avcılar-İstanbul

Geliş (Received): 29 Haziran (June) 2018 / Düzeltme (Revised): 31 Ağustos (August) 2018 / Kabul (Accepted): 19 Eylül (September) 2018

### ÖZ

Günümüzde yapılmakta olan mühendislik projeleriyle birlikte doğal kaynak ihtiyacı da giderek artmaktadır. İhtiyaçları karşılamak için, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek olması nedeniyle bazaltik kayalar tercih edilmektedir. Bu bağlamda, mühendislik uygulamalarında ve gerektiğinde farklı sektörlerde de kullanılacak bazaltların çatlak başlangıçlarının, yenilme eşik değerlerinin ve yük altındaki davranışlarının yanı sıra, bunları etkileyen mineralojik ve petrografik özelliklerinin de bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada farklı mineralojik ve petrografik özelliklere sahip bazaltik kayaların mekanik davranışlarının ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırmalar Marmara Bölgesi ve çevresindeki bazalt taş ocaklarından getirilmiş örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Mineralojik ve kimyasal bileşimleri belirlenen bazaltların, görüntü analizi yapılarak petrografik özellikleri sayısallaştırılmıştır. Laboratuvar çalışmaları sonucunda mekanik değerleri bulunmuş ve akustik emisyon yöntemiyle çatlak başlangıcı ve yenilme eşik değeri yükleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları  $0.33\sigma_c$  -  $0.54\sigma_c$  ve yenilme eşik değeri katsayıları da  $0.83\sigma_c$  -  $0.98\sigma_c$  arasında bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Bazalt, Akustik emisyon, Mineraloji-petrografi

### ABSTRACT

The necessity of natural resource gradually increases with engineering projects which are currently being carried out at the present time. For meeting the requirements, basaltic rocks are preferred due to their high strength and durability. In this context, it is important to know the mineralogical and petrographic characteristics of basalts, which used in engineering applications and when required different sectors, that affect their crack initiating, failure threshold and as well as the behavior under load. This study aimed to reveal the mechanical behavior of basaltic rocks which have different mineralogical and petrographic features. Research was carried out on samples that have been collected from the basalt quarries within Marmara Region and its surroundings. After mineralogical and chemical composition analysis, petrographic properties of basalts were digitized with the help of the image processing. At the end of the laboratory studies, mechanic properties were obtained and load values of crack initiation and failure threshold were determined with acoustic emission method. Obtained result show that load values of crack initiation value were found between  $0.33\sigma_c$  and  $0.54\sigma_c$  and the failure threshold value between  $0.83\sigma_c$  and  $0.98\sigma_c$ .

**Keywords:** Basalt, Acoustic emission, Mineralogic - petrographic

## GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada yaygın şekilde bulunan bazaltik kayaçlar, dayanımları ve durabilitelerinin yüksek olmasından dolayı çokça tercih edilen bir malzeme çeşididir. Farklı türdeki bazaltların yük altındaki davranışlarının ve yenilme özelliklerinin bilinmesi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi, doğal kaynakların doğru değerlendirilmesi ve sürdürülebilir olabilmesi açısından önemlidir.

Akustik emisyonun (AE) kayalar ile olan ilişkisi üzerine farklı araştırmacılar çalışmalar yapmıştır. Hardy (1972 ve 1981), çalışmalarında kaya gibi jeolojik malzemelerde akustik yayılmanın nasıl gerçekleştiğini belirtmemelerine rağmen birim deformasyon enerjisinin hızlıca boşalması sonucu gelişen deformasyonlar ve yenilmelerle ilgili olduğunu belirtmiştir.

Kayaların yük altındaki davranışlarını belirleyecek olan fiziksel ve mekanik özellikler onların bileşimleri ve dokularıyla doğrudan ilişkilidir. Kaya mühendisliğinde gerilme koşulları değiştikçe, doku ve bileşimdeki farklı elastik özellikteki unsurların sınırları boyunca veya en zayıf bileşenler içerisinde çatlak gelişiminin başladığı ve çatlaklanma başlangıcı yüklerinin, bileşim ve dokuya bağlı olduğu literatürdeki çalışmalarda ortaya konmuştur (Srinivasan vd., 1995; Suzuki vd., 1998; Seto vd., 1999; Wang vd., 2000; Park vd., 2001; Aydan vd., 2001).

Tuncay ve Ulusay (2002) tarafından AE nin özellikleriyle kaya mühendisliğinde kullanım örnekleri ve avantaj ve dezavantajlarını belirtmiştir.

Farklı tür kayaçlar (granit, bazalt, gabro, andezit gibi) üzerinde yapılan çalışmalar literatürde yer alsa da, farklı tür bazaltlar

kullanılarak, tüm fiziksel ve mekanik özelliklerinin bileşim ve doku ile olan ilişkilerini kıyaslayan ve doğrudan ele alan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmanın temel amacı bazaltik kayaçların bileşim ve doku özelliklerinin akustik emisyon özelliklerine etkisinin ortaya konulmasıdır.

## MALZEME, YÖNTEM VE BULGULAR

Türkiye'nin çeşitli bölgelerinden getirilen, farklı bileşim ve dokuya sahip bazaltik kayaçların içyapı özelliklerinin akustik emisyon davranışına etkisini tespit edebilmek için farklı taş ocaklarından blok örnekler alınmıştır. Örnekleme yapılan taş ocakları; Tekirdağ-Hayrabolu, Tekirdağ-Muratlı, Tekirdağ-Osmancık Köyü, Kütahya, Düzce, Çanakkale-Biga, Bursa-İznik ve Edirne-Keşan bölgelerinde yer almaktadır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bazalt karot örnekleri ve kodları.

Table 1. Basalt core samples and their codes used in laboratory studies.

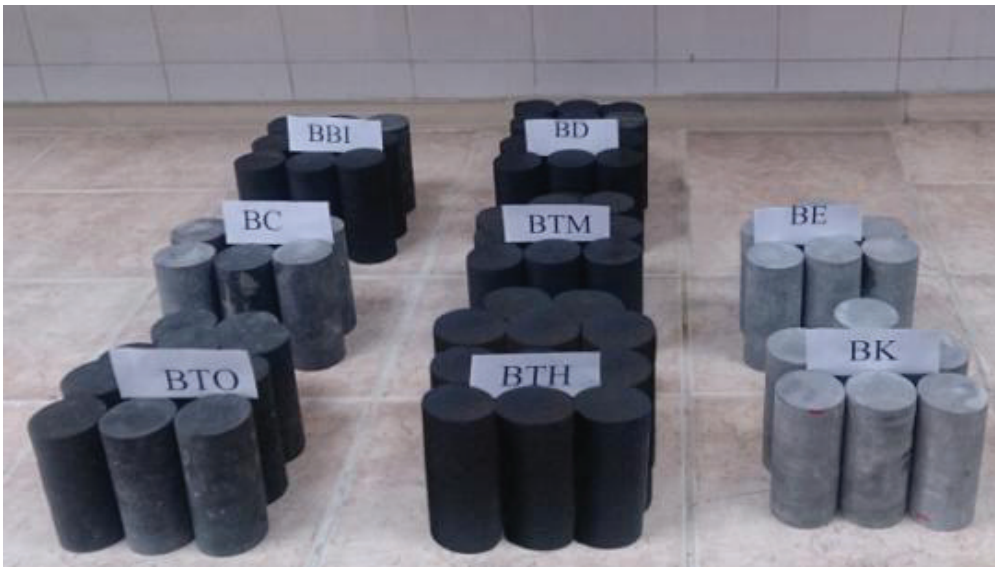
Örnek Kodu	Örneğin Alındığı Bölge
BTH	Tekirdağ- Hayrabolu
BTM	Tekirdağ- Muratlı
BTO	Tekirdağ- Osmancık Köyü
BK	Kütahya
BD	Düzce
BÇ	Çanakkale
BB	Bursa
BE	Edirne

Bazaltik kayaların mineralojik ve petrografik özelliklerinin, akustik emisyon davranışlarına etkisinin belirlenebilmesi için öncelikle numunelerden incekesitler hazırlanmış ve incelenmiştir. Farklı özelliklerdeki bazaltik

kayaçların kimyasal bileşimlerini belirlemek için ise XRF analizi yapılmış ve ana element oksit yüzdeleri bulunmuştur. Böylece kimyasal bileşimlerine göre incelenen kayaçlar sınıflandırılmış, mineralojik ve petrografik özellikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmaların ardından blok halinde getirilmiş olan bazaltik kayaçlardan NQ çapına uygun karot örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 1).

### Kimyasal Özellikler

Farklı bileşimlere sahip sekiz kayacın kimyasal özelliklerini saptamak amacıyla XRF yöntemi kullanılarak ana element oksit içerikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 1. Laboratuvar çalışmalarında kullanılan bazalt karot örnekleri.

Figure 1. Basalt core samples used in laboratory studies.

Çizelge 2. Bazaltik kayaçların ana element oksit yüzdeleri.

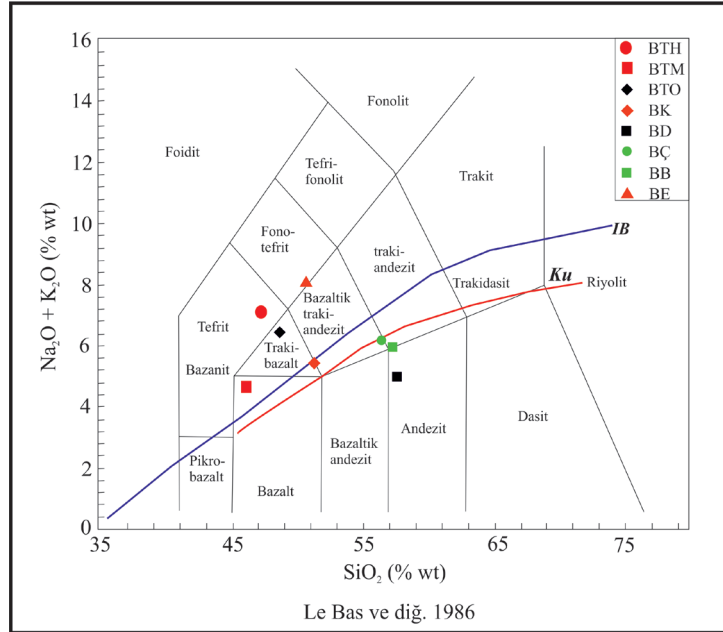
Table 2. The major element oxide fractions of basaltic rocks.

Ocak Kodu	Ana Element Oksit Yüzdeleri (%)							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
BTH	46.33	13.67	10.96	9.79	11.63	0.15	2.31	4.52
BTM	45.14	13.25	10.19	9.08	12.11	0.16	1.90	3.04
BTO	47.10	13.12	10.02	8.91	11.83	0.14	2.10	3.78
BK	51.73	18.32	5.87	9.08	3.09	0.15	2.39	3.31
BD	57.65	17.22	6.52	6.69	2.96	0.15	1.18	3.68
BÇ	56.63	18.52	5.95	6.65	3.34	0.15	3.28	3.03
BB	57.13	17.75	6.96	6.75	3.81	0.15	1.96	3.43
BE	49.67	12.26	7.89	7.91	12.74	0.14	5.51	2.53

Bazaltik kayaçların kimyasal özelliklerine göre;  $\text{SiO}_2$  değerleri %45.14 - %57.65 arasında değişmektedir ve en yüksek değer BD, en düşük değer ise BTM örneklerine aittir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  değerleri; %12.26 ile en düşük BE ve %18.52 ile en yüksek BÇ örneği arasında değişim göstermektedir.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  değerleri de %5.87 - %10.96 arasında değişmektedir ve en yüksek BTH örneğine, en düşük değer ise BK örneğine aittir. CaO içerikleri %6.65 - %9.79 arasında değişim gösterirken, en yüksek değer BTH ve en düşük değer ise BÇ örneğidir. MgO değerleri %2.96 - %12.74 arasında bir değişim göstermektedir ve BE örneği en yüksek, BD örneği ise en düşük değerlere sahiptir.  $\text{SO}_3$  değeri örneklerde birbirlerine yakın değerler vermekte olup %0.14 - %0.16 arasındadır.  $\text{K}_2\text{O}$  içerikleri %1.18 - %5.51 arasında değişim gösterirken en yüksek

BE ve en düşük BD örneğidir. Son olarak  $\text{Na}_2\text{O}$  verilerine bakıldığında değerler %2.53 - %4.52 arasında değişirken en yüksek değer BTH ve en düşük değer ise BE örneğindedir.

Bazaltik kayaçların kimyasal içerikleri doğrultusunda Le Bas vd. (1986)'a göre  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  değerleri kullanılarak örneklerin dağılımları yapılmıştır (Şekil 1). Bu doğrultuda BTH tefrit, BTM bazalt, BTO traki-bazalt, BK traki-bazalt, bazaltik traki-andezit, BD andezit, BÇ bazaltik traki-andezit, BB traki andezit, bazaltik traki-andezit, BE fenotefrit, bazaltik traki-andezit bileşimlerindedir. Ayrıca IB sınır ayırımına göre; BTH, BTM, BTO ve BE alkalin olup; BD, BÇ, BB ve BK subalkalin bölgededir. Kuno (1966)'ya göre ise; BTH, BTM, BTO, BE ve BK alkalin, BD, BÇ, BB subalkalin bölgede yer almaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. İncelenen kayaç örneklerinin  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  değerlerine göre isimlendirme diyagramındaki konumları (Le Bas vd., 1986).

Figure 2. The locations of the rock samples in the naming diagram according to  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} / \text{SiO}_2$  (Le Bas, 1986). IB: Irvine ve Baragar (1971)'e göre alkalin-subalkalin ayırımı, Ku: Kuno (1966)'ya göre alkalin-subalkalin ayırımı. IB: Irvine and Baragar (1971) according to alkaline-subalkaline separation, Ku: Kuno (1966) according to alkaline-subalkaline separation.

### Mineralojik ve Petrografik Özellikler

İnce kesitler üzerinde bazaltik kayaların mineralojik bileşimini kantitatif olarak belirlemek amacıyla modal analiz (nokta sayımı) yapılmıştır. Modal analiz için her bir bazalt kesiti üzerinde 2000 nokta sayılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda kayaların mineral ve hamur alanları nokta sayımı ile elde edilen mineral içeriklerinin yüzdeleri de Çizelge 3'te verilmiştir. Bazaltik kayaların hamur ve doku özellikleri, mineral içerikleri, ayrışma durumları ve petrografik bileşimlerine göre sınıflandırmaları da Çizelge 4 ve Şekil 3'te verilmiştir. Hamuru oluşturan plajiyoklas ve piroksenler "mikrolit" olarak yer alır.

Yapılmış olan nokta sayım hesaplarına göre, kesit içindeki en fazla hamur oranı %81.4 değeri ile Tekirdağ Hayrabolu örneğine aittir. En az hamur oranı ise %48.5 ile Edirne Keşan örneğine aittir. Aynı zamanda BE örneği %32.2 değeri ile en fazla piroksen alan içeriğine sahipken, BTM örneği ise %5.6 ile en az piroksen içeriğine sahiptir. Plajiyoklas yüzdelere göre; en yüksek değer %30.2 ile BB örneği ve en düşük değer ise %2.6 ile BK örneğine aittir. Biyotit minerali, sadece farklı bir parajenez veren BE örneğinde gözlenmiştir ve kesit içerisinde %4.1 oranında bulunmaktadır. Opak mineral alan oranlarına göre en yüksek %1.7 değeri ile BTO ve en düşük %0.4 değeri ile BK örneklerinde görülmektedir. Olivin içeriklerine bakıldığında ise en yüksek değer %15 ile BTO ve en düşük değer % 2.8 ile BK örneğine aittir.

Çizelge 3. Bazaltik kayaların nokta sayımı ile belirlenen mineral içerik oranları.

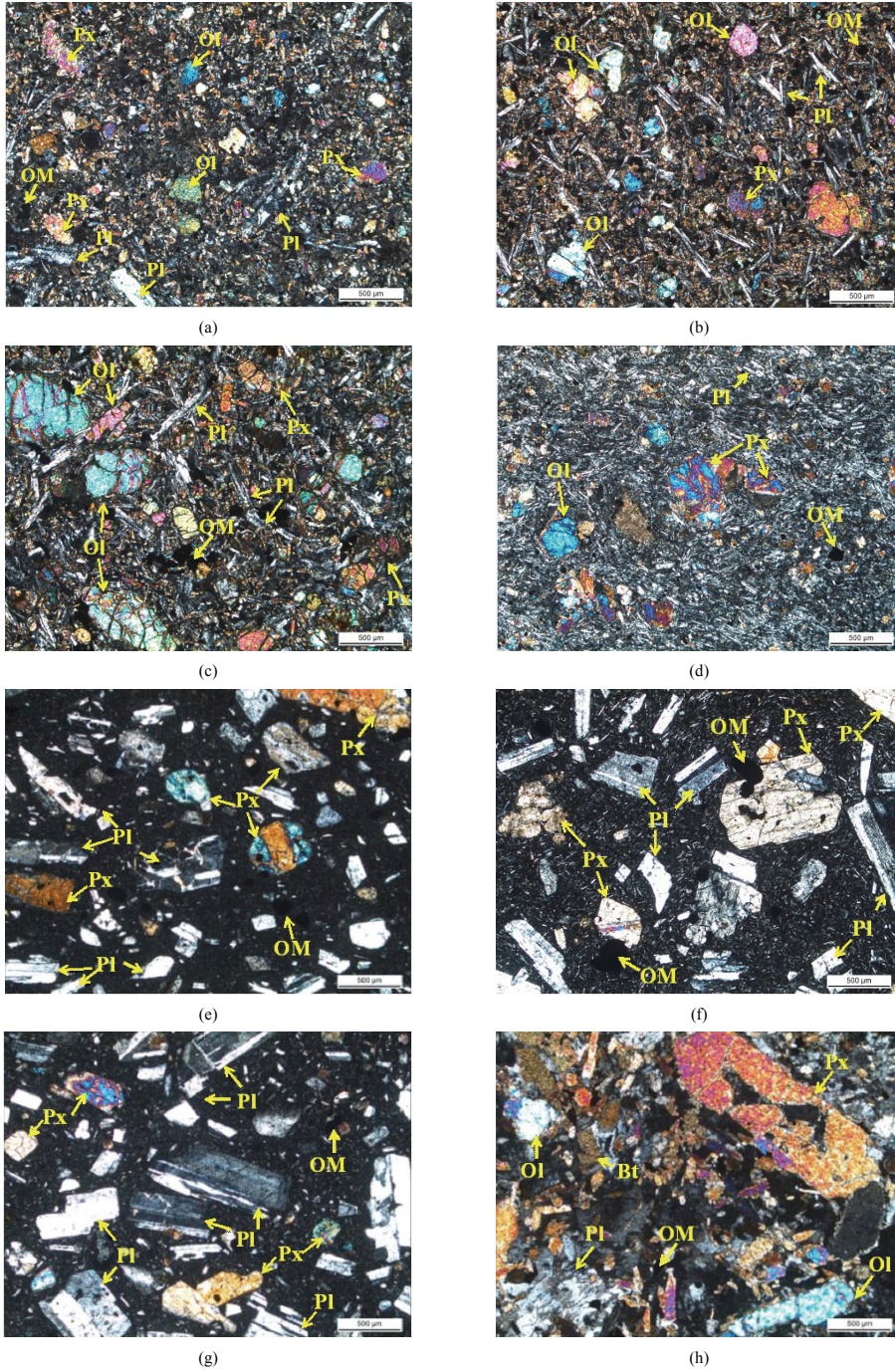
Table 3. Mineral ratios of basaltic rocks determined by point counting.

Örnek Kodu	Mineral İçeriği (%)					
	Hamur	Piroksen	Olivin	Plajiyoklas	Biyotit	Opak Mineral
BTH	81.4	9.9	3.3	4.4	-	1
BTM	68.2	5.6	10.5	14.2	-	1.5
BTO	65.3	7.2	15	10.8	-	1.7
BK	75.7	18.5	2.8	2.6	-	0.4
BD	59.7	12.6	-	26.9	-	0.8
BÇ	56.6	13	-	29.4	-	1
BB	50.5	18.5	-	30.2	-	0.8
BE	48.5	32.2	3.8	10.8	4.1	0.6

Çizelge 4 . Bazaltik kayaçların alındıkları bölgelere göre mineral içeriği, doku, hamur, ayrışma durumu ve mikroskopik tanımlamaları.  
Table 4. Mineral contents, texture, matrix, weathering and microscopic descriptions of basaltic rocks according to the areas they are taken from.

Örnek Kodu	Numunenin Alındığı Bölge	Mineral İçeriği	Doku	Hamur	Ayrışma	*Mikroskopik Tanımlama
BTH	Tekirdağ / Hayrabolu	Olivin, plajiyoklas, piroksen, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas. piroksen. volkan camı	Silisleşme	Bazalt
BTM	Tekirdağ / Muratlı	Piroksen, Plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik	Plajiyoklas Kristalleri. piroksen ve opak	Talklaşma (olivin)	Bazalt / Diyabaz
BTO	Tekirdağ / Osmancıkköy	Olivin, plajiyoklas, opak	Hipokristalin porfirik	Volkan camı. piroksen. plajiyoklas	Kloritleşme. silisleşme	Olivin Bazalt
BK	Kütahya	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Holokristalin porfirik. Akma dokusu	Plajiyoklas mikroliti ağırlıklı ve çok küçük piroksen	Karbonatlaşma. killeşme. talklaşma	Olivin Bazalt
BD	Düzce	Plajiyoklas, piroksen(ojit), opak	Holohyalin porfirik	Volkan camı. çok küçük piroksen ve plajiyoklas	-	Bazalt
BÇ	Çanakkale / Biga	Piroksen, plajiyoklas, olivin, opak	Hipidiyamorf porfirik	Volkan camı ağırlıklı	Hidrotermal alterasyon. karbonatlaşma (piroksen). erime-çözünme (plajiyoklas)	Bazalt
BB	Bursa / İznik	Plajiyoklas, Piroksen, opak	Hipohyalin porfirik	Volkan camı ağırlıklı. az mikrolit	-	Bazalt
BE	Edirne / Keşan	Piroksen, plajiyoklas, biyotit, opak	Holokristalin porfirik	-	Kloritleşme	Mafik Damar Kayacı

\* Streckeisen ve Le Bas (1991)' e göre



Şekil 3. Örneklerin polarizan mikroskobu altındaki görünümü.

a) BTH, b) BTM, c) BTO, d) BK, e) BD, f) BÇ g) BB, h) BE, (Px: Piroksen, Pl: Plajiyoklas, Ol: Olivin, OM: Opak Mineral) (Çift Nikol. 4X).

Figure 3. View of samples under polarizing microscope.

### Akustik Emisyon

Akustik emisyon; gerilme altındaki malzemelerde bir ya da daha çok yerel kaynağın hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanmaktadır (ASTM, 2002). Bütün katı malzemeler belli bir elastikliğe sahiptir; dış kuvvetler altında genişler veya sıkıştırılırlar, kuvvet ortadan kalktığında ise bir yay gibi geri gelebilirler. Kuvvet ve dolayısıyla elastik deformasyon ne kadar fazla ise elastik davranış o kadar fazla olacaktır. Eğer elastik limit aşılsa kırılma veya çatlama gerçekleşir. Elastik olarak genişmiş malzemede boşluk, inklüzyon vb. bir kusur varsa çatlamlar yüksek derecede gerilen bu noktalarda oluşarak hızlı bir dislokasyonla malzeme enerjisini atarak gevşer. İşte bu şekilde elastik enerjinin hızla serbest bırakılmasına “Akustik Emisyon” olayı denir. Yöntem, örneğe sabitlenecek bir alıcı sensör, (Şekil 4) oluşan titreşimlerin frekanslarını arttıracak güç yükselticiler ve akustik emisyon sayılarının grafiğe döküldüğü, tüm sistemin bağlı olduğu bir bilgisayar düzeneğinden oluşmaktadır (Şekil 5). Tuncay ve Ulusay (2002) yaptıkları çalışmalar ile Türkiye’de henüz kullanımı yaygın olmayan AE tekniğini, AE sinyallerinin (olgusunun) özelliklerini, izleme sistemlerinin amaca göre kullanımını, şev, yeraltı ve arazi gerilmelerinin belirlenmesinde yöntemin avantaj ve dezavantajlarını ana hatlarıyla belirtmişlerdir. Tuncay ve Ulusay (2008) ile Tuncay ve Obara (2012) AE tekniğini kullanarak arazi gerilmelerinin belirlenebilmesine yönelik değerlendirmelere de gitmişlerdir.

Çatlak başlangıcı, bazı kaynaklarda gerilim kaynaklı hasarın ilk aşaması olarak belirtilmiştir. Fakat ISRM’in önerilen kuralları çatlak başlangıcının tespitinden bahsetmemektedir (Nicksiar, 2012). Özellikle yapılan son çalışmalar (Chang ve Lee, 2004), çatlak başlangıcı

seviyelerinin bilinmesinin yeraltı kazılarında oluşabilecek sökülme (kavlaklanma) direnci için yaklaşık bir değer olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

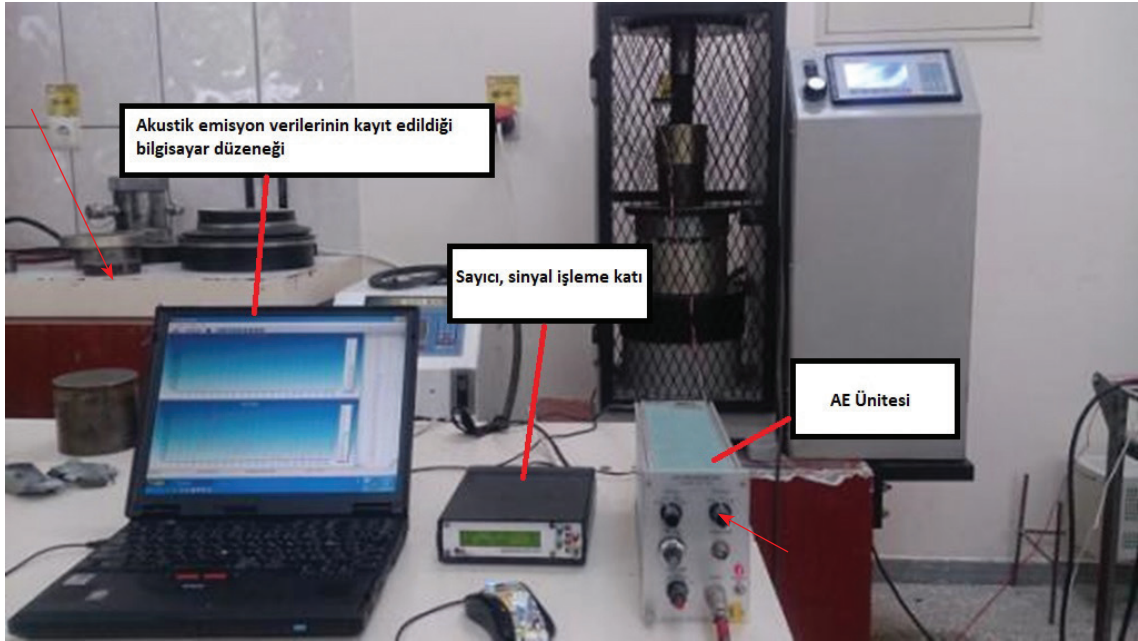


Şekil 4. Gerilme artışına bağlı olarak gelişen kHz mertebesindeki tüm titreşimleri algılayan sensör ve aynı zamanda karota yapılandırılmış olan deformasyon ölçerlerin görünümü.

*Figure 4. A sensor that detects all vibrations in the kHz range due to the increment stress rate and the appearance of deformation meters sticked on the core sample at the same time.*

Mikro çatlak ağının gelişimi ve ilerlemesi iki farklı sürecin etkisi altındadır; maruz kalınan periyodik yüklerin sınırının aşılmasına veya yenilme basıncı eşik değerinin kontrolüne bağlıdır (Eberhardt, 1999b). Gerçekleşen bir basınç sırasında örnek üzerinde farklı çatlak aşamalarının geliştiği (çatlakların kapanması, çatlak başlangıcı, çatlakların birleşmesi veya çatlak yenilmesi) bilinmektedir.





Şekil 5. Akustik emisyon deney düzeneğinin genel görünümü.

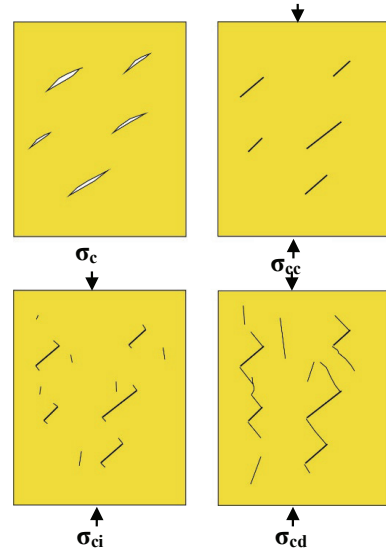
Figure 5. General view of the acoustic emission test setup.

Basınç sırasında kayaç örneğinde gerçekleşen çatlak gelişiminin aşamaları Şekil 6'da gösterilmiştir. Eberhardt (1998) tarafından ayrıntılı bir şekilde tarif edilen çatlak gelişimlerinin eşik değerleri Chang ve Lee (2004) tarafından özet olarak aşağıdaki gibi tanımlanmıştır;

Deformasyon-gerilme grafiğinde çatlakların kapandığı bölge, ilk yanal eğim çizgisinin minimum noktasıdır.

Çatlak başlangıcı, kümülatif AE eğrilerinin ilk kez önemli ölçüde artmaya başladığı noktadır.

Çatlakların yenilmesi, eğim çizgisinin negatiften pozitifte geçtiği veya ikincil lineer çizgi aralığından aniden saptığı ve arttığı nokta olarak tarif edilmektedir.



Şekil 6. Şematik olarak farklı gerilme seviyelerinde kırık başlangıcı, gelişimi ve kapanmasının gösterimi (Cai, vd., 2004'ten değiştirilerek alınmıştır).

Figure 6. Schematic demonstration of fracture initiation, development and closure at different stress levels (modified after Cai et al., 2004).

( $\sigma_c$  ; Tek Eksenli Basınç Dayanımı,  $\sigma_{cc}$  ; Çatlak Kapanması Gerilmesi,  $\sigma_{ci}$  ; Çatlak Başlangıcı Gerilmesi,  $\sigma_{cd}$  ; Çatlak Yenilmesi Gerilmesi)

Maksimum sıkışma dayanımı ile çatlak başlangıcı gerilme değeri arasında bir eşik değeri verilerek, maksimum gerilme değeri bilinen sağlam bir kayaç örneği için çatlak başlangıcı gerilme değeri hakkında bir yaklaşımda bulunulabilir. Eberhardt (1999b), granitler üzerinde yaptığı çalışma sonucunda çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi eşik değeri katsayılarını 0.39 UCS ve 0.75 UCS olarak tespit etmiştir. Cai vd. (2004), çatlak başlangıcı sürecinin maksimum tek eksenli sıkışma dayanımı değerinden 0.3 ile 0.5 kat daha düşük

basınç gerilmelerinde başladığını belirtmişlerdir. Ündül vd. (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda gerilme deformasyon grafiklerinden yararlanarak, çatlak başlangıcı eşik gerilme değerini yüklerini ortalama 0.39-0.43 olarak tespit etmişlerdir. Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilen değerlere göre bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik gerilme değerleri  $0.33 \sigma_c$  ile  $0.54 \sigma_c$  (%33-%54) basınç gerilmeleri arasında değişirken, çatlak yenilme eşik değeri katsayıları ise  $0.83 \sigma_c$  ile  $0.98 \sigma_c$  (%83-%98) arasında değişmektedir.

Çizelge 5. Akustik emisyon yöntemi ile oluşturulan grafiklerden elde edilen verilere göre bazalt örneklerinin yenilme süreci boyunca farklı çatlak seviyelerinde aldıkları sıkışma dayanımı değerleri.

Table 5. According to the results obtained from the graphs generated by the acoustic emission method, the values of the pressure resistances of the basalt specimens obtained at different crack levels during the deformation process.

Örnek Kodu	Tek Eksenli Basınç Dayanımı -Deney Süresi $\sigma_c$ (MPa)-c(sn)	Çatlakların Kapanma Gerilmesi -Çatlak Kapanma Süresi $\sigma_{cc}$ (MPa)-cc(sn)	Çatlak Başlangıcı Gerilmesi - Çatlak Başlangıcı Süresi $\sigma_{ci}$ (MPa)-ci(sn)	Çatlakların Yenilme Gerilmesi -Çatlak Yenilme Süresi $\sigma_{cd}$ (MPa)-cd(sn)
BTH	271 - 712	25 - 30	147 - 408	244 - 670
BTM	252 - 706	19 - 98	93 - 296	211 - 690
BTO	174 - 460	13 - 34	85 - 294	164 - 458
BK	205 - 584	22 - 92	76 - 258	192 - 566
BD	272 - 786	11 - 84	110 - 372	268 - 764
BÇ	149 - 462	16 - 50	60 - 194	143 - 446
BB	252 - 558	18 - 60	90 - 226	226 - 512
BE	162 - 484	14 - 70	54 - 174	150 - 456

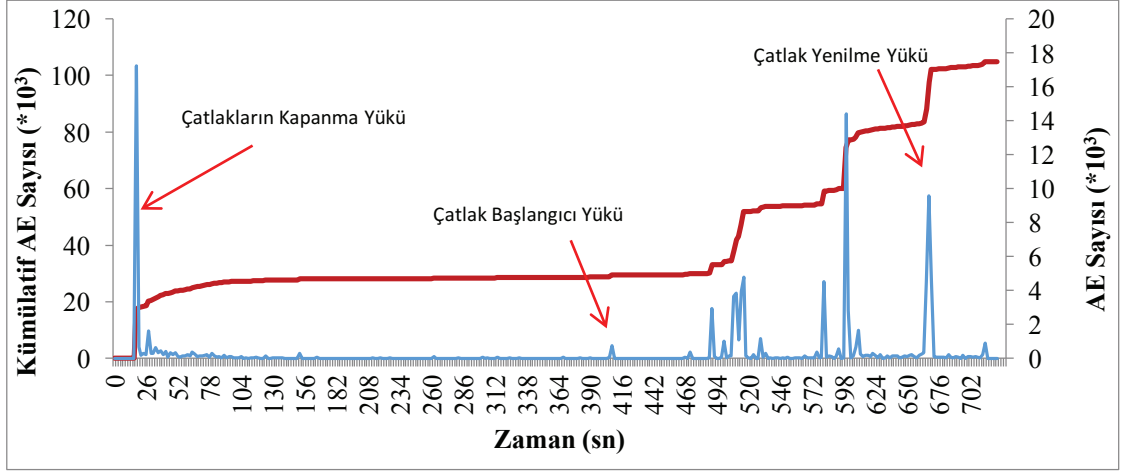
Çizelge 6. Bazalt örneklerinin farklı çatlak seviyelerinde ve yenilme süreleri içinde aldıkları eşik değeri katsayıları.  
Table 6. Threshold value coefficients of basalt samples taken at different crack levels and during the time of failure times.

Örnek Kodu	Çatlak Başlangıcı Eşik Değeri Katsayısı $\sigma_{ci}/\sigma_c$	Çatlak Yenilme Eşik Değeri Katsayısı $\sigma_{cd}/\sigma_c$	Çatlak Başlangıcı Süresi Katsayısı ci(sn)/c(sn)	Çatlak Yenilme Süresi Katsayısı cd(sn)/c(sn)
BTH	0.54	0.90	0.57	0.94
BTM	0.37	0.83	0.42	0.97
BTO	0.49	0.94	0.63	0.99
BK	0.37	0.93	0.44	0.97
BD	0.40	0.98	0.47	0.97
BÇ	0.40	0.95	0.42	0.95
BB	0.36	0.89	0.41	0.91
BE	0.33	0.92	0.35	0.94

Maksimum sıkışma dayanımı ile çatlak başlangıcı gerilme değeri arasında bir eşik değeri verilerek, maksimum gerilme değeri bilinen sağlam bir kayaç örneği için çatlak başlangıcı gerilme değeri hakkında bir yaklaşımda bulunulabilir. Eberhardt (1999b), granitler üzerinde yaptığı çalışma sonucunda çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi eşik değeri katsayılarını 0.39 UCS ve 0.75 UCS olarak tespit etmiştir. Cai vd. (2004), çatlak başlangıcı sürecinin maksimum tek eksenli sıkışma dayanımı değerinden 0.3 ile 0.5 kat daha düşük basınç gerilmelerinde başladığını belirtmişlerdir. Ündül vd. (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda gerilme deformasyon grafiklerinden yararlanarak, çatlak başlangıcı eşik gerilme değerini yüklerini ortalama 0.39-0.43 olarak tespit etmişlerdir. Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilen değerlere göre bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik gerilme

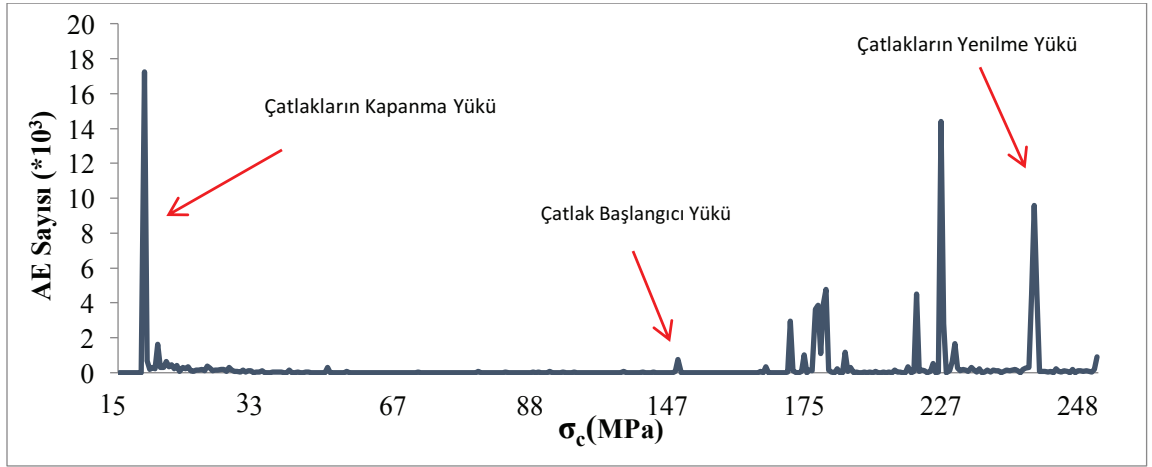
değerleri 0.33  $\sigma_c$  ile 0.54  $\sigma_c$  (%33-%54) basınç gerilmeleri arasında değişirken, çatlak yenilme eşik değeri katsayıları ise 0.83  $\sigma_c$  ile 0.98  $\sigma_c$  (%83-%98) arasında değişmektedir.

Tekirdağ-Hayrabolu bazaltı için yapılan örnek çalışmada, tek eksenli basınç deneyleri sırasında en yüksek 271 MPa gerilme değeri alan Tekirdağ-Hayrabolu bazaltında; 25 MPa'da çatlakların kapanması, 149 MPa'da ise çatlak başlangıcı gerçekleşmiştir. Yaklaşık olarak 244 MPa'da çatlakların yenilmesi meydana gelmiştir. 712 sn süren basınç deneyi sırasında Tekirdağ-Hayrabolu bazaltı 408. sn'de çatlaklanmaya başlamış, zamanla gelişen ikincil çatlaklarında birlikte hareket etmeye başlamaları ile yenilme 670. sn'de meydana gelmiştir (Şekil 7-10). Bu veriler doğrultusunda çatlak başlangıcı eşik değeri katsayısı 0.54  $\sigma_c$ , çatlak yenilmesi eşik değeri ise 0.90  $\sigma_c$  olarak bulunmuştur (Çizelge 6).



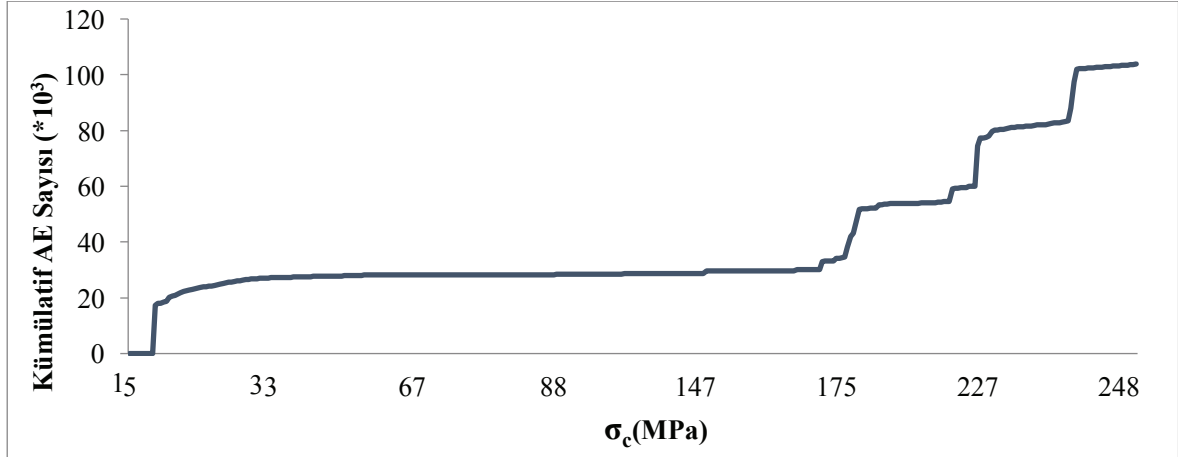
Şekil 7. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltının AE izleme yöntemi ile elde edilen veri grafiği.

Figure 7. Data graph obtained by AE monitoring method of Tekirdağ- Hayrabolu basalt.



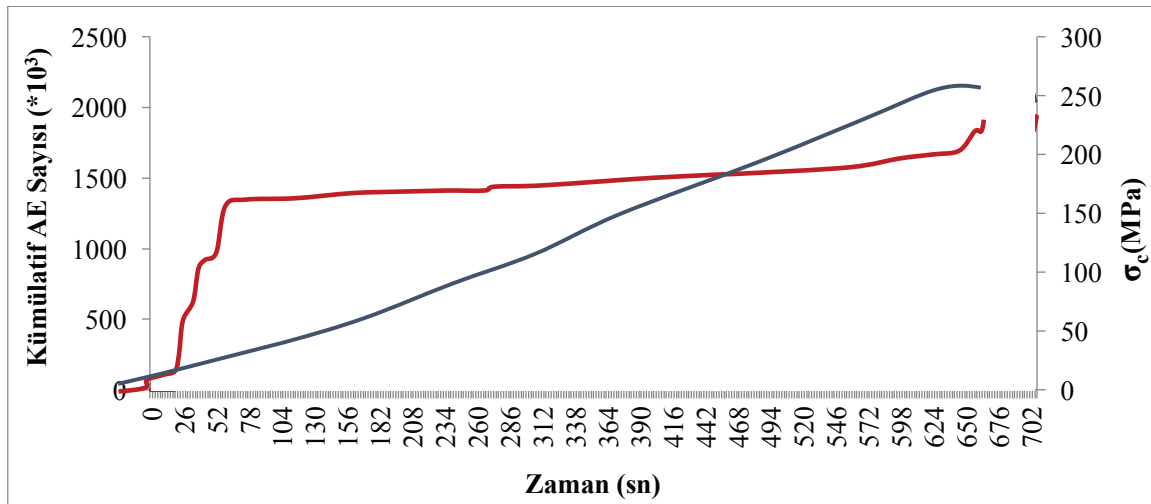
Şekil 8. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltının basınç dayanımlarına göre AE verilerinin dağılımı.

Figure 8. Distribution of AE data according to pressure resistances of Tekirdağ- Hayrabolu basalt.



Şekil 9. Tekirdağ- Hayrabolu bazaltında uygulanan yüke karşı meydana gelen AE verilerinin kümülatif olarak değişimi.

Figure 9. Cumulative change of AE data from the stratum of the Tekirdağ-Hayrabolu basalt.



Şekil 10. Tekirdağ- Hayrabolu örneğine uygulanan basınç dayanımı sırasında zamanla değişim gösteren kümülatif AE veri grafiği.

Figure 10. A cumulative AE data plot that shows a change over time during the pressure resistance applied to the Tekirdağ-Hayrabolu example.

## VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

Kayaç içerisindeki çatlak sistemi, hamur bileşimi ve dokusu, minerallerinin boyutu, türü ve ayrışma durumları, fiziksel özellikleri (porozite, yoğunluk, birim hacim ağırlık, su emme gibi) ve tüm bu özelliklerin farklı şekillerde birlikte çalışması ile kayacın dayanımını, çatlak başlangıcını, yenilme mekanizmasını ve diğer mekanik özelliklerini etkilemektedir.

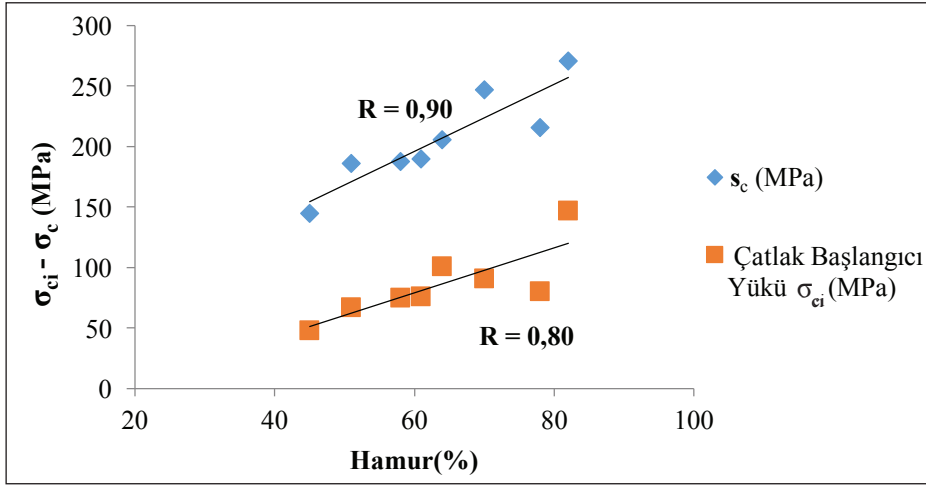
Eberhardt (1999a), Tuğrul ve Zarif (1999) granitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmalarda, kayacın mineralojik bileşimleri ile mekanik özelliklerini karşılaştırdıklarında tane boyu küçüldükçe dayanımın arttığını belirtmişlerdir.

Ündül ve diğerleri (2015) andezitik kayaçlar üzerinde yaptıkları çalışmada; plajiyoklas ve amfibol fenokristallerinin toplamının, hamura olan oranı (Plajiyoklas+Amfibol/Hamur) arttıkça dayanımlarının arttığını tespit etmişlerdir. İncelenen kayaçlar üzerinde yapılan basınç deneylerinden elde edilmiş olan ortalama dayanım değerleri ile akustik emisyon çalışmaları sonucunda elde edilmiş olan çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları çarpılarak, Çizelge 7’de verilen ortalama çatlak başlangıcı basınç değerleri ( $\sigma_{ci}$ ) elde edilmiştir. Bu değerlere göre, bazaltik kayaçlarda hamur oranı arttıkça maksimum basınç dayanımı ve çatlak başlangıcı yükü de artmaktadır (Şekil 11).

Çizelge 7. Bazaltik kayaçların ortalama çatlak başlangıcı gerilme değerleri ve minerallerin hamura olan oranları.

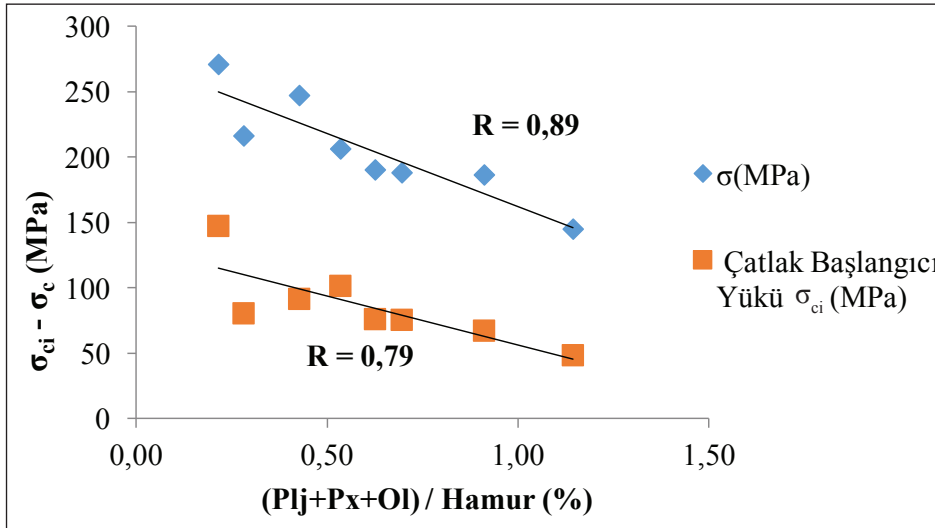
Table 7. Mean crack initiation stress values of basaltic rocks and the proportion of minerals to matrix.

Örnek Kodu	Basınç Dayanımı $\sigma_c$ (MPa)	Çatlak Başlangıcı Gerilmesi $\sigma_{ci}$ (MPa)	Hamur (%)	(Pl+Px+Ol)/Hamur (%)
BTH	271	147	82	0.21
BTM	247	91	70	0.43
BTO	206	101	64	0.53
BK	216	80	78	0.28
BD	190	76	61	0.62
BÇ	188	75	58	0.69
BB	186	67	51	0.91
BE	145	48	45	1.14



Şekil 11. Bazaltik kayaçların hamur yüzdeleri ile çatlak başlangıcı değerlerinin ve tek eksenli basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

Figure 11. Comparison of matrix percentages and crack initiation values and uniaxial compressive strengths of the basaltic rocks.



Şekil 12. Bazaltik kayaçların mineral alan yüzdelerinin hamur yüzdelerine oranının çatlak başlangıcı ve tek eksenli basınç dayanımı değerleri ile karşılaştırılması.

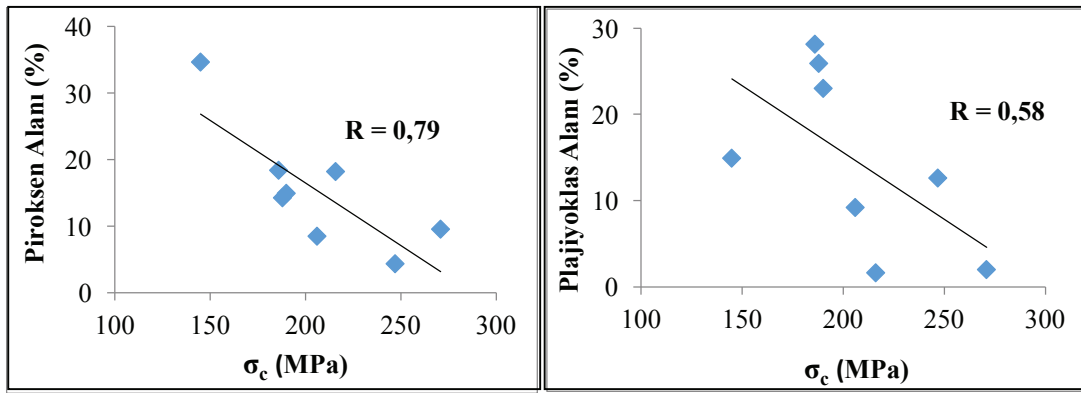
Figure 12. Comparisons of the ratio of the mineral area percentages of the basaltic rocks to the percentage of the matrix are compared with the crack initiation and uniaxial compressive strength values.

Bazaltik kayaçlarda minerallerin alanları arttıkça ve tane boyları büyüdükçe, dayanım değerleri düşmektedir. Plajiyoklas, piroksen ve olivin fenokristal alanları toplanıp hamura

oranlandığında, değer küçüldükçe, yani hamur oranı arttıkça maksimum yükün ve çatlak yenilme yükünün de arttığı görülmektedir (Çizelge 7 ve Şekil 12).

Dayanımı etkileyen en önemli unsurlardan biri hamurun bileşimi ve özelliğidir. 8 farklı bazaltik kayaç içerisinde, piroksen, plajiyoklas ve olivin minerallerinin hamurun neredeyse tamamına hakim olduğu örnekler (BTH, BTM, BTO, BK) yüksek dayanım gösterirken, volkan camı ve plajiyoklas ağırlıklı olanlar (BD, BÇ, BB) daha düşük basınç dayanımlarında yenilmektedir. Bunun yanı sıra, hamur içerisinde fenokristal boyutlarda bulunan ana minerallerin (piroksen, plajiyoklas gibi) alanları arttıkça, kayaçların dayanımları düşmektedir (Şekil 13).

görülen boşlukları olmasıdır. BK örneğinde de hamurda var olan çatlak sistemleri, akma dokusu ve minerallerindeki ayrışmadan dolayı gözlenen killeşmeler nedeniyle dayanımı beklenen değerden daha düşüktür. Çünkü volkan camı ayrışmadan daha çok etkilenmekte ve kile dönüşmektedir. Bunların dışında hamuru volkan camı ağırlıklı olan BD örneği ise ayrılmış mineral içermediğinden yüksek dayanımlıdır, fakat yenilme yükü gerçekleştikten hemen sonra maksimum yükü almaktadır. Bu şekilde kırılma davranmasının nedeni, hamurunun



Şekil 13. Piroksen ve plajiyoklas fenokristal yüzdelерinin dayanım değerleriyle karşılaştırılması.

Figure 13. Comparison of strength values of pyroxene and plagioclase phenocrystal fractions.


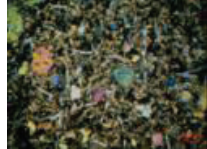
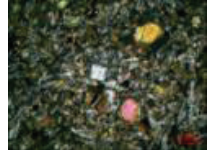

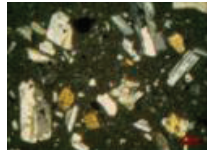


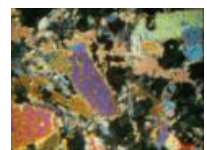
Çatlak ve ayrılmış mineral içermeyen kayaçlar, bunları içeren kayaçlara göre, yük altında daha uzun bir süre yenilmeden kalabilmektedir. Genel olarak dayanımı yüksek olan BTH ve BTM örneklerinde, yenilmenin meydana geldiği yük değerleri de yüksektir. Fakat benzer petrografik özellikler gösteren BTO ve BK örneklerinin dayanımları ve yenilme yükü değerleri beklenilenden göreceli daha düşüktür. Bunun nedeni BTO örneğinin dayanımlı hamur dokusuna rağmen, gözle

ağırlıklı olarak volkan camından meydana gelmiş olması ve hamurdaki çatlaklardır. Genel olarak çatlak başlangıcı eşik değeri katsayılarına bakıldığında, dayanımı yüksek olan örneklerin katsayı değerleri de yüksektir. Fakat hamurun bileşiminden ve dokusundan, ayrılmış mineral içeriğinden, mineral boyutlarından ve çatlak sistemlerinden kaynaklanan sebepler nedeniyle beklenilenden daha düşük veya daha yüksek katsayı değerleri çıkabilmektedir (Çizelge 8).



Çizelge 8. Bazaltik kayaçların mikroskop görüntüleri ve mekanik özellikleri.

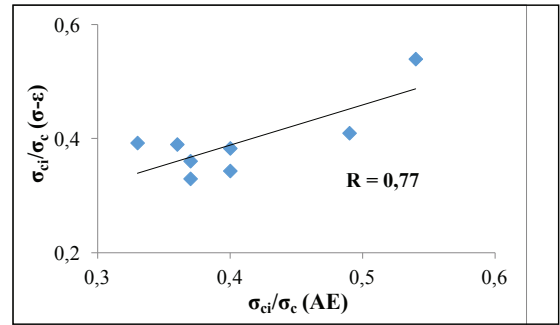
Table 8. Microscopic views and mechanical properties of basaltic rocks.

Örnek Kodu	Çatlak Başlangıcı Eşik Değeri Katsayısı ( $\sigma_{ci}/\sigma_c$ )	Çatlak Yenilmesi Eşik Değeri Katsayısı ( $\sigma_{cd}/\sigma_c$ )	Basınç Dayanımı $\sigma_c$ (MPa)	Elastisite Modülü E (GPa)	Bazaltların Polorizan Mikroskop Altındaki Görüntüleri (4x)
BTH	0.54	0.90	271	117	
BTM	0.37	0.83	247	65	
BTO	0.49	0.94	206	91	
BK	0.37	0.93	216	67	
BD	0.40	0.98	190	101	
BÇ	0.40	0.95	188	57	
BB	0.36	0.89	186	76	
BE	0.33	0.92	145	103	

Çatlak yenilme yükü ( $\sigma_{cd}$ ), kayacın kırılabilirliği hakkında yaklaşımda bulunmamıza yardımcı olmaktadır. Kayacın yenilme yükü aldığı maksimum yüke oranlandığında, elde edilen değer ne kadar büyük ise kayacın o kadar kırılabilir (gevrek) davrandığı söylenebilir. Bu çalışma ile yenilme eşik değeri katsayısı 0.83-0.98  $\sigma_c$  arasında bulunan bazaltların, Eberhardt (1999b), Chang ve Lee (2004) tarafından daha önce yapılmış çalışmalarda yenilme eşik değeri 0.75-0.89 UCS arasında bulunmuş olan granitik kayaçlara göre, biraz daha kırılabilir davrandıkları söylenebilir. Diğer bir anlatımla, granitik kayaçlar aldıkları maksimum dayanım yüküne göre, erken yenilseler bile tane gücü ile birbirlerine kenetlenmekte ve bir süre daha basınç altında parçalanmadan kalabilmektedirler. Fakat bazaltik kayaçlar hamur ve fenokristallerden oluşan bir yapıda olduklarından, yenilme gerçekleşikten çok daha kısa bir süre sonra alabileceği maksimum yükte parçalanmaktadırlar. Eberhardt (1999a) granit, granodiyorit ve pegmatit üzerinde yaptığı çalışmalarla çatlak başlangıcında önemli olanın, ana minerallerin gücü olduğu ve çatlağın yayılma davranışında bu minerallerin etkin rol aldığı belirtmiştir. BD ve BB örneklerinde ayrılmış minerallerin olmaması, var olan çatlakların da birbirleri ile bağlantılı olmayıp, mineralleri kesmemesi nedeniyle yüksek dayanım gösterdikleri söylenebilir. Bunun yanı sıra, bazaltik kayaçlarda hamurun bileşimi ve dokusu da, kayacın dayanımı ve çatlak başlangıcı için etken rol oynamaktadır.

Bugüne kadar kayaçların çatlak başlangıcı değerleri çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen farklı yöntemlerle bulunmuştur. İlk olarak Brace (1966) hacimsel deformasyon - basınç dayanımı grafiğinden yararlanarak eğrinin lineer çizgiden saptığı nokta olarak tespit etmiştir. Lajtai (1974) eksenel basınç - yanal deformasyon grafiğinden, Diederichs (2007)

Poisson oranı ile basınç dayanımı grafiğinden, Stacey (1981) eksenel ve yanal deformasyon grafiğinden, Eberhardt (1998) AE değeri - basınç dayanımı grafiğinden ve Nicksiar (2012) LRS (yanal deformasyon grafiğinden yararlanarak geliştirilmiş bir yöntem)' den yararlanarak çatlak başlangıcı yüklerini ve eşik değerlerini tespit etmeye çalışmışlardır. Nicksiar ve Martin (2012) birçok farklı yöntemi kullanarak birbirlerine yakın sonuçlar elde etmiş ve diyoritler için çatlak başlangıcı eşik değeri katsayısını  $0.35\sigma_c - 0.56\sigma_c$  arasında bulmuştur. Bu çalışma kapsamında yanal deformasyon - basınç dayanımı grafiği ve akustik emisyon sayıları kullanılmak üzere iki farklı yöntemden yararlanarak bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Neticede her iki yöntemden elde edilen sonuçların birbirleri ile uyumlu olduğu (Şekil 14) ve bazaltik kayaçlarda çatlak başlangıcı eşik değerlerinin bileşim ve dokusal özellikleri nedeniyle  $0.33\sigma_c - 0.54\sigma_c$  arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir.

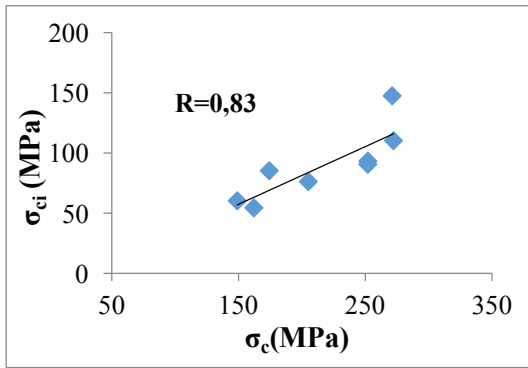


Şekil 14. İki farklı yöntem kullanılarak bulunmuş olan çatlak başlangıcı eşik değeri katsayılarının karşılaştırılması.

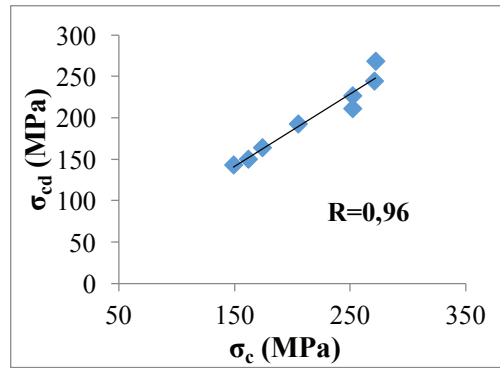
Figure 14. Comparison of crack initiation threshold values found using two different methods.

Akustik emisyon verilerinden elde edilen çatlak başlangıcı eşik değerleriyle gerilme-deformasyon grafiklerinden elde edilen veriler birbirleri ile uyumludur. Bu sonuç, iki yöntemin de kayaçların çatlak başlangıcını eşik değerini bulmak için kullanılabilir yöntemler olduklarını desteklemektedir. Fakat uygulaması daha kolay olduğu için akustik emisyon yönteminin kullanılması önerilebilir.

Gerilme deformasyon grafiklerine göre tek eksenli basınç dayanımı değeri arttıkça çatlak başlangıcı yükünün de arttığı Ündül vd. (2015) tarafından belirtilmiştir. Akustik emisyon yöntemiyle elde edilen çatlak başlangıcı ve çatlak yenilmesi yüklerinin, kayacın dayanım özellikleriyle uyumlu olduğu Şekil 15'de gösterilen basit regresyon analizlerinde görülmektedir.



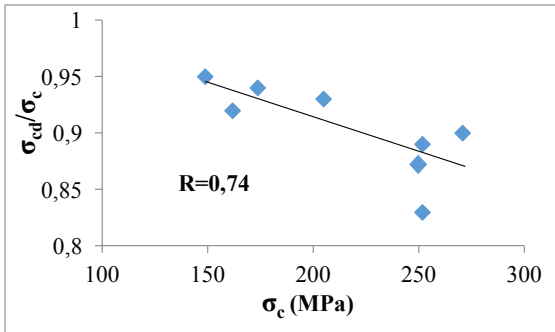
(a)



(b)

Şekil 15. Basınç dayanımı değerleri ile a) çatlak başlangıcı ve b) çatlak yenilme yüklerinin karşılaştırılması.

Figure 15. Comparing the unconfined strength values with a) crack initiation and b) crack failure.



Şekil 16. Çatlak yenilme eşik değeri katsayısı ile basınç dayanımının karşılaştırılması (BD örneği hariç).

Figure 16. Comparing the crack resistance threshold value with the compressive strength (except BD specimen).

BD örneği hariç akustik emisyon verilerinden elde edilen verilere göre çatlak yenilme eşik değeri katsayısı azaldıkça tek eksenli basınç dayanımı değerinin arttığı görülmektedir (Şekil 16). Düzce bazaltının boşluğunun az olmasına rağmen, çatlaklı olması nedeniyle yenilme gerçekleşikten sonra daha fazla yük alamayıp, maksimum yüke ulaştığı için uyumsuz bir değer verdiği düşünülmektedir.

## SONUÇLAR

Yapılan çalışma sonucunda akustik emisyon verileri ile bazaltik kayaçların daha önceki çalışmalarda belirtilmemiş olan çatlak başlangıcı

ve yenilme eşik değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Hamur oranı arttıkça maksimum basınç dayanımı ve çatlak başlangıcı yükü de artmaktadır.
- Plajiyoklas, piroksen ve olivin fenokristal alanları toplanıp hamura oranlandığında, yani hamur oranı arttıkça maksimum yükün ve çatlak yenilme yükünün de arttığı görülmektedir.
- Çalışmaya konu olan bazaltlar için çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları  $0.33\sigma_c$  -  $0.54\sigma_c$  ve kalıcı deformasyonun sağlandığı yenilme eşik değeri katsayıları da  $0.83\sigma_c$  -  $0.98\sigma_c$  arasında bulunmuştur.
- Dayanımı yüksek olan örneklerin katsayı değerleri yükseldikçe, çatlak başlangıcı eşik değeri katsayıları da yükselmektedir.
- Bu katsayılardan yararlanılarak, dayanımları ve bileşimleri bilinen bazaltik kayaçların çatlaklanma başlangıcı gerilme seviyelerinin ve yenilme yüklerinin tespiti için genel bir yaklaşımda bulunulabilir.

Ayrıca yazarlar bu önemli kayaçların yenilmesinin tahmininde kullanılan bu yöntemin diğer kayaç türleri üzerinde de ayrıntılı olarak araştırılmasını önermektedirler.

## KATKI BELİRTME

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliği'nin 51152 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- ASTM E 1316, 2002, Standard Terminology for NDT.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tuncay, E., Kumsar, H., Yılmazoğlu, M., Yüzer, E., 2001. Batı Anadolu'nun etkin gerilim ortamı. Jeoteknik III, İzmir ve Çevresinin Deprem ve Jeoteknik Sempozyumu, İzmir, Ö. Orhun ve Y. Tuner (eds.), Bildiriler CD'si, 14 s.
- Brace, W.F., Paulding, B.R., Scholz, C., 1966. Dilatancy in fracture of crystalline rocks, Journal of Geophysical Research, 71 (16), 3939-3953.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Maejima, T., Morioka, H., Minami, M., 2004. Generalized crack initiation and crack damage gerilims thresholds of brittle rock masses near underground excavations, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(5), 833-847.
- Chang, S.H., Lee, C.I., 2004. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, 1069-1086.
- Diederichs, M.S., 2007. Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunneling. Canadian Geotechnical Journal, 44, 1082-1116.
- Eberhardt E., 1998. Brittle rock fracture and progressive damage in uniaxial compression. Ph.D Thesis, Department of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon.
- Eberhardt, E., Stead, D., Read, R.S., 1998. Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rock. Canadian Geotechnical Journal, 35 (2), 222-223.
- Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999a. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of gerilims-induced brittle fractures. Rock Mechanics and Rock Engineering, 32(2), 81-99.

- Eberhardt, E., Stead, D., Stimpson, B., 1999b. Quantifying progressive pre-peak brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 361-380.
- Hardy, H. R. Jr., 1972. Application of acoustic emission techniques to rock mechanics research. *Acoustic Emission*, ASTM STP 505, Philadelphia, R.G. Liptai, D.O. Harris, and C.A. Tatro (eds.), American Society for Testing and Materials, 41-83.
- Hardy, H. R. Jr., 1981. Application of acoustic emission techniques to rock and rock structures: A state-of-the-art review. *Acoustic Emission in Geotechnical Engineering Practice*, STP 750, Philadelphia, V.P. Drnevich and R.E. Gray (eds.), American Society for Testing and Materials, 4-92.
- Kuno H. 1966. Lateral variation of basalt magma types across continental margins and island arcs. *Bulletin of Volcanology*, 29, 195-222.
- Lajtai, E.Z., 1974. Brittle fracture in compression. *International Journal of Fraction*, 10(4), 525-536.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, 745-750.
- 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, 607-617.
- Park, P., Park, N., Hong, C., Jeon, S., 2001. The influence of delay time and confining pressure on in-situ stress measurement using AE and DRA. *Proceedings of the 38<sup>th</sup> US Symposium, Rock Mechanics in the National Interest*, Washington, D. Elsworth, J.P. Tinucci and K.A. Heasley (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 1281-1284.
- Stacey, T.R., 1981. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, 18 (6), 469 – 474.
- Srinivasan, C., Nair, G.J., Raju, N.M., 1995. Microseismic precursor analysis prior to seismic events in Kolar gold mine fields: A case study. *Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 371-381.
- Suzuki, T., Hikita, S., Hashimoto, S., 1998. Measurement of landslide behaviour by an acoustic emission method. *Proceedings of the 8th International IAEG Congress*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1733-1739.
- Seto, M., Nag, D.K., Vutukuri, V.S., 1999. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 17, 241-266.
- 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.
- Tuncay, E., Ulusay, R., 2002. Acoustic Emission (AE) technique: 1- Basic principles and its areas of application in rock engineering, *Yerbilimleri, Bulletin of Earth Sciences Application and Research Center of Hacettepe University*, 25, 65-82.
- Tuncay, E., Ulusay, R., 2008. Relation between Kaiser Effect (KE) levels and prestresses applied in laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 45(4), 524-537.
- Tuncay, E., Obara, Y., 2012. Comparison of stresses obtained from acoustic emission and compact conical-ended borehole overcoring techniques and an evaluation of Kaiser Effect level. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 71(2), 367-377.
- Ündül, Ö., Amann, F., Aysal, N., Plötze, M., 2015. Micro - textural effects on crack initiation and crack propagation of andesitic rocks. *Engineering Geology*, 1-9.
- Wang, H.T., Xian, X.F., Yin, G.Z., Xu, J., 2000. A new method of determining geostresses by the acoustic emission Kaiser Effect. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, 543-547.

