



Akustik Emisyon (AE) tekniği: 2- AE tekniğiyle Türkiye’de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme

Acoustic Emission (AE) technique: 2 – A preliminary investigation on the determination of in-situ stresses by AE technique in Turkey

Ergün TUNCAY, Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

Hidehiko WATANABE, Hisataka TANO

Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Koriyama, JAPONYA

Ömer AYDAN

Tokai Üniversitesi, Deniz İnşaat Mühendisliği Bölümü, Shimizu, JAPONYA

Erdoğan YÜZER

İstanbul Teknik Üniversitesi, Maden Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, İSTANBUL

ÖZ

Arazi (in-situ) gerilmelerinin büyüklüklerinin, yönelimlerinin ve dağılımlarının belirlenmesi, yeraltı açıklıklarının duraylılığı, destek sistemlerinin tasarımı, kaya patlamalarının önceden kestirimi ve şev duraylılığı gibi mühendislik uygulamalarının yanı sıra, depremlerin yorumlanması açısından da oldukça büyük bir önem taşımaktadır. Arazi gerilmelerinin belirlenmesi için önerilen kuramsal yaklaşımların yanı sıra, hidrolik çatlatma, gerilim boşaltma ve gerilim dengeleme gibi arazi deney yöntemleri bulunmaktadır. Ayrıca, maliyeti daha düşük olan Akustik Emisyon (yayıma) (AE) yöntemi, küresel konumlama sistemine (GPS) dayanan yöntem ve fay çiziklerinden gerilmeyi belirleme yöntemi gibi yöntemlerden de yararlanılmaktadır. Diğer arazi deney yöntemlerine göre daha pratik ve maliyetinin düşük olması, ayrıca bazı yöntemlerdeki sınırlamaları içermemesi nedeniyle, AE tekniğinin kullanımıyla ilgili çalışmalar özellikle son on yılda Japonya ve ABD’de yaygınlaşmıştır. Türkiye’de çok sayıda büyük kaya mühendisliği yapısı bulunmasına rağmen, gerilmelerin yerinde belirlenmesi için gerçekleştirilen arazi deneyi yok denecek kadar azdır. Bu çalışmada öncelikle, AE tekniğinin gerilmelerin belirlenmesinde kullanımı anlatılmış, yaygın olarak kullanılan diğer yöntemlerle kısaca karşılaştırılmış, yöntemden elde edilen sonuçları etkileyen faktörler ve yöntemin sınırlamaları tartışılmıştır. Ayrıca, Türkiye’deki çeşitli açık işletmelerden, tünel, yeraltı işletmeleri ve taş ocaklarından elde edilmiş kaya bloklarından laboratuvarında alınan yönlü karotlar üzerinde yapılan AE deneylerinden elde edilen bulgular sunularak yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Türkiye’de farklı yerler için AE tekniğinden belirlenen düşey gerilmelerin bazıları, kuramsal olarak hesaplanan örtü tabakası gerilmeleriyle benzerlik gösterirken, bazıları oldukça farklı çıkmıştır. Ayrıca AE yöntemiyle Türkiye’deki ölçüm yerleri için belirlenen ortalama yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranları, dünyanın çeşitli yerlerinde yapılan yerinde deneylerden elde edilen sonuçların alt sınırına yakın konumda yer almıştır.

Anahtar kelimeler: Akustik emisyon (AE), arazi gerilmesi, Kaiser etkisi.

ABSTRACT

Determination of the magnitude, orientation and distribution of in-situ stresses has a prime importance in engineering applications such as stability of underground openings, prediction of rock bursts, slope stability, and also for the interpretation of earthquakes. In addition to theoretical approaches for the determination of in-situ stresses, so-

me in-situ testing methods such as hydraulic fracturing, overcoring and stress compensating method are being employed. Besides, the cheaper techniques including Acoustic Emission (AE) method, the methods based on global positioning system (GPS) and fault striations are also utilized. Because the AE method is cheaper and simpler when compared to other in-situ testing methods and does not have some limitations which are involved by some other methods, investigations on this method became more common particularly in the last decade in USA and Japan. Although many rock engineering structures exist in Turkey, there is no considerable amount of in-situ stress measurements. In this study, firstly the use of AE technique for in-situ stress measurements, comparison of the technique with the other commonly employed methods, the factors affecting the results from AE measurements and limitations of the method are briefly discussed. In addition, the results of the AE tests obtained from the oriented core specimens, which are extracted from the blocks sampled from various open pit and underground mines, tunnels and quarries in Turkey, are presented and assessed. The results reveal that there are some similarities between the vertical stresses determined from the AE technique and theoretically calculated overburden stresses by using depth and unit weight of the rocks, while some of them show evident differences. In addition, the ratios of average horizontal and vertical stresses calculated from the AE measurements in Turkey take place at the lower bound of those obtained from in-situ stress measurement at the different parts of the world.

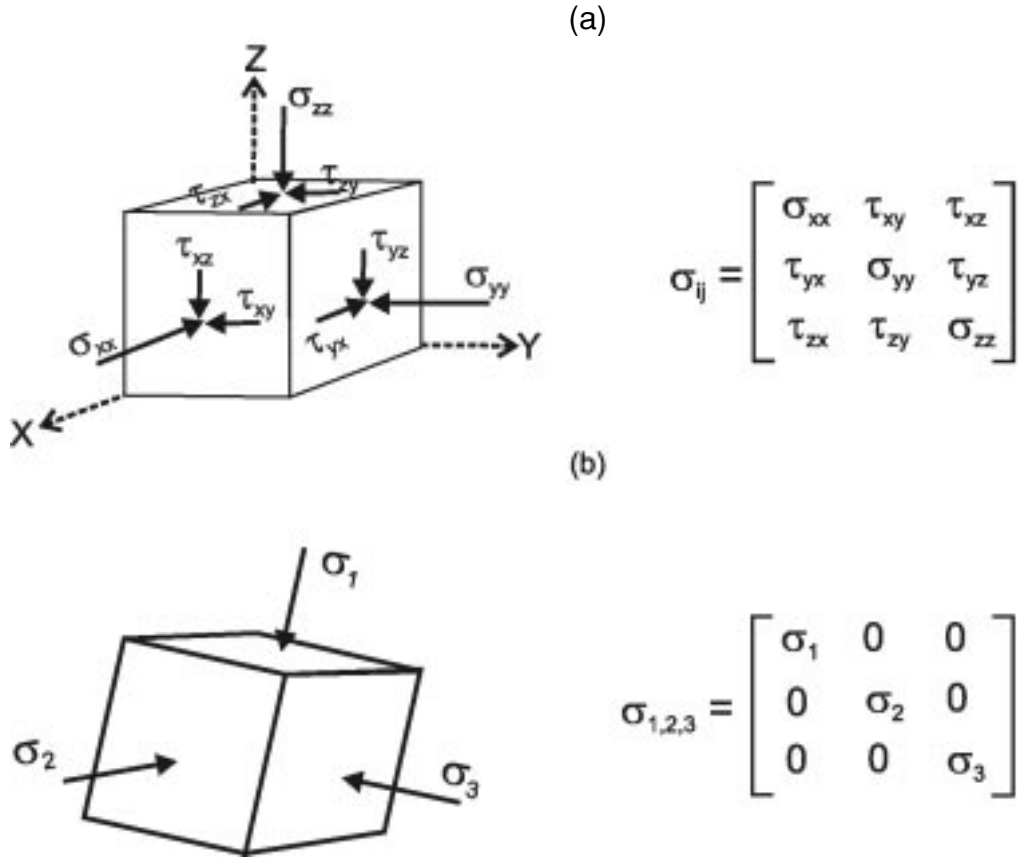
Key words: Acoustic emission (AE), in-situ-stress, Kaiser effect.

GİRİŞ

Arazi gerilmelerinin belirlenmesi için, başta kuramsal yaklaşımlar olmak üzere, bazı arazi deneyleri ve dolaylı yöntemler kullanılmaktadır. Yer kabuğunun karmaşık bir yapıya sahip olması, kuramsal yaklaşımların güvenilirliğini ciddi olarak azaltmakta ve özellikle Türkiye gibi engebeli bir topoğrafyaya sahip ve aktif tektonik bölgelerdeki mühendislik yapılarının tasarımı arazi deneylerinden yararlanılmasını zorunlu kılmaktadır. Arazi gerilmelerinin ölçülmesi amacıyla ISRM (Kim ve Franklin, 1987) tarafından, yassı kriko, hidrolik çatlatma, USBM ve CSIRO gerilim boşaltma yöntemleri önerilmektedir. Bununla birlikte, özellikle gerilim boşaltma yöntemlerinde bazı gelişmeler kaydedilmiş olup, yarım küre ve koni şekilli deformasyon ölçerlerin kullanıldığı gerilim boşaltma yöntemleri de geliştirilmiştir (Kobayashi vd., 1991 – Amadei ve Stephansson, 1997'den; Sugawara ve Obara 1995 ve 1999). Bu yöntemlerin yanı sıra, faylanma mekanizması (odak mekanizması) çözümü, küresel konumlama sistemine (GPS) dayanan yöntem ve fay çiziklerinden gerilmeyi belirleme yöntemi gibi dolaylı yöntemler de kullanılmaktadır.

Bir yerde gerilme ölçümünden amaç, o yerde ölçülen eksen yönlerindeki gerilme tansörünün bileşenlerinin belirlenerek asal gerilmelerin hesaplanması, ya da doğrudan asal gerilmelerin belirlenmesidir (Şekil 1). Genellikle düşey bir sondaj deliği içinde gerçekleştirilen hidrolik çatlatma deneyinde en büyük ve en küçük yatay

gerilmeler belirlenmekte, düşey arazi gerilmesi ise deneyin yapıldığı derinlik ve örtü tabakasının birim hacim ağırlığı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Bu deneyde ayrıca, asal gerilmelerden birinin düşey yönde etki ettiği varsayılmakta ve deneyden belirlenen en büyük ve en küçük yatay gerilmeler diğer asal gerilmeler olarak değerlendirilmektedir. Ancak, özellikle yer kabuğunun yüzeye yakın kısımlarında topoğrafyadaki değişkenliğin arazi gerilmeleri üzerinde oldukça etkin olduğu ve dolayısıyla asal gerilmelerin yönlerinin de oldukça farklılık gösterdiği bilinmektedir (Amadei ve Stephansson, 1997). Bu nedenle, topoğrafyanın değişkenlik gösterdiği bölgelerde düşey bir sondajda gerçekleştirilen hidrolik çatlatma deneyinden elde edilen sonuçlar yatay düzlemdeki en büyük ve en küçük gerilmeleri vermektedir. Ancak, özellikle yüzeye yakın kesimler için, elde edilen bu gerilmeler üç asal gerilimden ikisine karşılık gelmemektedir. Buna karşın, yatay veya eğimli olarak açılan belirli sayıdaki sondajda hidrolik çatlatma deneyleri gerçekleştirilerek gerilme tansörünün tüm bileşenlerinin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Ancak uygulamada genellikle düşey sondajlarda hidrolik çatlatma deneyi yapılmaktadır. Bununla birlikte, çok derin yerlerde diğer yöntemlerin kullanımı mümkün olmadığından, hidrolik çatlatma tekniği günümüz koşullarında bu derinliklerde uygulanabilen tek deney olma özelliğini taşımaktadır. Yeraltı açıklıklarında uygulanan gerilim dengeleme yöntemlerinden yassı kriko deneyinde, gerilme tansörünün sadece bir tek normal bileşeninin belirlenmesi mümkün olabilmektedir. Bu deneyden belirlenen gerilme değe-



Şekil 1. (a) Gerilme tensörü bileşenlerinin ve (b) asal gerilmelerin birim küp üzerinde ve matris formunda gösterilişi.

Figure 1. Illustration of the stress tensor components (a) and principal stresses (b) on a unit cube and in matrix form.

ri ise, birincil gerilme olmayıp, ölçümün yapıldığı bölgedeki kazı yüzeyine paralel konumdaki, yassı kriko düzlemine dik olarak etkiyen normal gerilmeyi temsil etmektedir. Tinchon (1986; Amadei ve Stephansson, 1997'den) ile Pinto ve Cunha (1986; Amadei ve Stephansson, 1997'den), yassı kriko deneyinin tünel çeperinde farklı yönlerde uygulanmasıyla birincil gerilme tensörünün tüm bileşenlerinin belirlenebileceğini ifade etmektedirler. Bunun için yassı kriko deneyine ait ölçüm noktalarından elde edilen ikincil gerilmeler tünelin şekli gözönünde bulundurularak geri çözümlenmeye tabi tutulurlar. Yeraltı açıklıklarında uygulanan gerilim boşaltma yönteminde ise, tüm gerilme bileşenlerinin belirlenmesi yarımküre veya konik uçlu deformasyon ölçerler kullanılarak mümkün olmakla birlikte, silindirik olarak açılan tek bir delikte ise mümkün olamamaktadır. Bu deney, genellikle tünel duvarında açılan deliklerde uygulanmaktadır. Deney-

de birincil gerilmelerin belirlenebilmesi için, delik uzunluğunun tünelin açılmasıyla oluşan ikincil gerilme ortamını geçip birincil gerilmelerin temsil edilebileceği bir uzaklığa kadar ulaşması gerekir. Arazi deneylerinin en önemli dezavantajları pahalı olmaları ve uygulamayla ilgili bazı zorlukları içermeleridir. Bununla birlikte, düşey yönde açılmış sondajlarda gerçekleştirilen hidrolik çatlatma deneyinin ve silindirik olarak açılan tek bir delikte uygulanan gerilim boşaltma yönteminin çok engebeli topoğrafyaya sahip bölgelerdeki sığ derinliklerde uygulanması durumunda ortaya çıkan kısıtlamalar, bu deneylerden gerilme tensörünün tüm bileşenlerinin belirlenmesini engellemektedir.

Gerilmeyi dolaylı yoldan belirleme yöntemlerinden biri olan faylanma mekanizması çözümüyle yaklaşık olarak deprem odağı derinliğindeki asal gerilmelerin oranlanmış büyüklükleri ve yönleri

(Aydan vd. 2001; Aydan ve Kim, 2002), küresel konumlama sistemine dayanan yöntemde (GPS) (Aydan, 2000a; Aydan vd., 2000) ise sadece yeryüzeyindeki yatay gerilme hızlarının büyüklükleri ve yönleri belirlenebilmektedir. Bu nedenle, bu yöntemlerden yararlanılarak bir lokasyondaki gerilme tansörünün salt tüm bileşenlerinin ve asal gerilmelerin belirlenmesi mümkün olamamaktadır. Bunların yanı sıra, fay çiziklerinin yönünden yararlanılarak gerilmenin belirlenmesi amacıyla Anderson (1951), Bott (1959) ve McKenzie (1969) tarafından önerilmiş “dolaylı yönden gerilmeleri belirleme yöntemleri” bulunmakla birlikte, bu yöntemlerden gerilme tansörünün tüm elemanlarının saptanması mümkün olamamaktadır. Bu kısıtlamaları gidermek üzere Angelier (1975, 1984) ve Aydan (2000b) tarafından “fay çiziklerine dayalı yöntemler” önerilmiştir. Aydan (2000b)’ın önerdiği fay çiziklerine dayalı yöntemde, gerilme tansörünün bileşenlerinin herbirinin düşey gerilmeye oranlarını ifade eden katsayılar belirlenmektedir. Ancak bu yöntemde bir girdi parametresi olan fay düzleminin sürtünme açısı için bir varsayım yapılması gerekmektedir. Sürtünme açısı değeri çok yüksek ve çok düşük basınçlar altında Byerlee (1978) tarafından incelenmiş olup, bunun 30° ile 40° arasında değişebileceği belirtilmiştir. Fay çizikleri yöntemi, ekonomik ve fiziksel nedenlerden dolayı gerilmeyi doğrudan ölçme yöntemlerinin her zaman kullanılmasının mümkün olmadığı yerlerde gerilme ortamı hakkında bir ön değerlendirme yapılması ve/veya doğrudan ölçüm yöntemlerinin doğruluğunun sınanması amacıyla mühendislere ve yerbilimcilerle önerilen pratik bir yöntemdir.

AE tekniğinin diğer yöntemlere göre daha pratik ve daha az maliyetli olması nedeniyle, bu yöntemle gerilmelerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmalar son yıllarda yaygınlaşmıştır. Buna karşın, AE yönteminin gerilmelerin belirlenmesinde kullanımıyla ilgili tartışmalar da artmıştır (örn; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Momayez ve Hassani, 1992; Holcomb 1993; Seto vd., 1999). Türkiye’de bugüne değin yeraltı ve açık işletme yöntemleriyle birçok madenin işletilmesine ve büyük ölçekte mühendislik yapılarının inşa edilmesine karşın, arazi gerilmesi ölçümleriyle ilgili yayınlara rastlanmamaktadır. Türkiye’de sadece, Oymapınar hidroelektrik yeraltı santralının inşaatında ve Etibank’ın Küre bakır-kurşun-çinko işletmesinde

yerinde gerilme ölçümü yapıldığı Aydan ve Paşamehmetoğlu (1994) ve Aydan (2000b) tarafından belirtilmektedir. Ayrıca, AE tekniği kullanılarak Watanabe ve Tano (1999) ile Watanabe vd. (1999) tarafından Kapadokya bölgesinde, Aydan vd. (2001) tarafından ise Batı Anadolu’da arazi gerilmelerinin belirlenmesine yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır. AE yönteminin pratik ve daha az maliyetli olması nedeniyle, Türkiye’de bu konuyla ilgili boşluğun, bir ölçüde de olsa, giderilmesine katkı sağlayabileceği düşünülerek, aşağıdaki bölümlerde AE yönteminin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanımı anlatılmış ve ölçümleri etkileyen faktörler tartışılmıştır. Ayrıca, Türkiye’de değişik yörelerden alınan yönlü örnekler üzerinde yazarlar tarafından yapılmış AE deneylerinin sonuçları sunulmuş yorumlanmıştır.

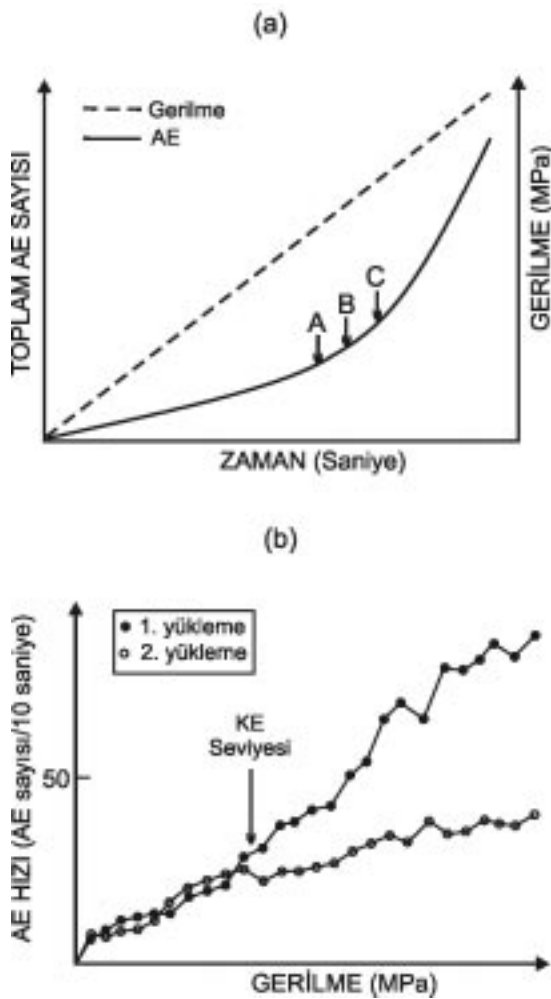
AE TEKNİĞİYLE ARAZİ GERİLMELERİNİN BELİRLENMESİ

AE tekniğinden yararlanılarak arazi gerilmelerinin belirlenmesi için Kanagawa vd. (1976; Hayashi vd., 1979’dan) tarafından yapılan uygulama, Kaiser Etkisi (KE) seviyesinin tanımı ve bu seviyenin neyi ifade ettiği gibi konulara Tuncay ve Ulusay (2002) tarafından kısaca değinilmiştir. Bu bölümde ise, KE seviyesinin daha duyarlı şekilde belirlenmesi amacıyla kullanılan yaklaşımın esasları verilmiş ve bu seviyenin belirlenmesinde etkin olan faktörler tartışılmıştır.

Kaiser Etkisi (KE) Seviyesinin Belirlenmesi İçin Kullanılan Yaklaşım

AE deneyinden elde edilen “zaman – AE sayısı” eğrilerinden KE seviyesinin belirlenmesi, basit gibi görünmesine rağmen, bazı durumlarda güçleşmektedir. Örneğin, Şekil 2a’da görülen A, B, C noktalarından hangisinin seçileceği konusunda yorumlama aşamasında karışıklık olabilmektedir. Bu nedenle, Kanagawa vd. (1976; Hayashi vd., 1979’dan)’nin çalışmasından sonra, KE seviyesinin belirlenmesi için bazı araştırmacılar tarafından çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir (Yoshikawa ve Mogi, 1981 ve 1990; Hayashi, 1979; Boyce, 1981-Hardy vd. 1989’dan; Momayez vd., 1992; Shen, 1995; Watanabe ve Tano, 1999; Shin vd., 2000). Yoshikawa ve Mogi (1981 ve 1990) tarafından önerilen yaklaşım, kendi içinde bazı çelişkileri içermektedir. Bu araştırmacılar, KE seviyesinin belirlenmesi için AE deneyini tek

eksenli koşullar altında, 1. ve 2. yükleme çevrimi şeklinde arka arkaya iki kez gerçekleştirip, bu yüklemelerden elde edilen “zaman-AE sayısı” eğrilerinin farklılık göstermeye başladığı zamandaki gerilmenin KE seviyesi olduğunu belirtmektedirler (Şekil 2b). Ancak Hardy vd. (1989), 2. yüklemede deneyin başlangıcından itibaren AE sayısında azalma olması gerektiğini vurgulamışlardır. Bu çalışma kapsamında, yazarların uygulamalarında da, Hardy vd.



Şekil 2. (a) Tipik bir “toplam AE sayısı – zaman – gerilme” grafiğinde KE seviyesinin belirlenmesinde farklı yorumlamalara ilişkin bir örnek ve (b) Yoshikawa ve Mogi (1981 ve 1990) tarafından önerilen KE belirleme yöntemi.

Figure 2.(a) An example for different interpretations on the determination of KE levels on a typical “total AE count- time – stress” plot, and (b) the method suggested by Yoshikawa and Mogi (1981 and 1990) for the determination of KE.

(1989)’nin belirttiği gibi, 2. yüklemede belirlenen AE sayılarında ciddi azalmaların olduğu gözlenmiştir. Yukarıda değinilen çalışmalarda önerilen diğer yöntemlerde ise, KE seviyesini belirleme yaklaşımları farklı olmasına karşın, birbirine oldukça yakın KE değerleri elde edilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, Watanabe ve Tano (1999) tarafından önerilen ve doğrudan parametrik sistemden (Tuncay ve Ulusay, 2002) elde edilen veriler üzerinde işlem yapılabilen, ayrıca uygulanması da oldukça basit olan yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, Şekil 3’te görüldüğü gibi, “toplam AE sayısı – zaman” grafiği üzerinde her bir nokta için AE sayısı artışı, $RI(t)$ olarak adlandırılan fark, aşağıda verilen eşitlikten belirlenmektedir.

$$RI(t) = CR(t+\Delta t) - CR(t) \quad (1)$$

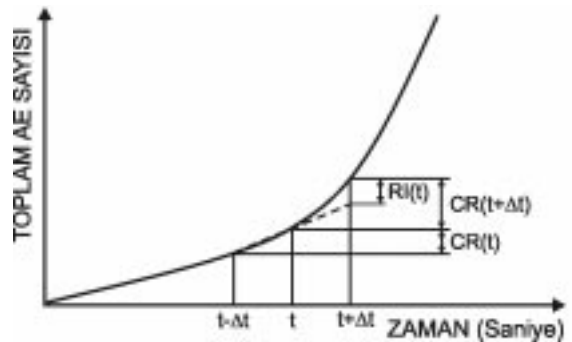
Burada;

$CR(t+\Delta t)$: $t+\Delta t$ ve t zamanlarındaki toplam AE sayıları arasındaki fark

$CR(t)$: t ve $t-\Delta t$ zamanlarındaki toplam AE sayıları arasındaki fark

Δt : Zaman farkı

“Toplam AE sayısı – zaman” grafiği üzerinde her bir nokta için Eşitlik (1)’de verilen işlem yapıldıktan sonra “AE sayısı artışı $RI(t)$ – zaman” grafiği çizilerek, en büyük $RI(t)$ değerinin elde edildiği zamandaki gerilme değeri KE seviyesi olarak belirlenmektedir. Watanabe ve Tano (1999), Δt zaman aralığını 40 saniyeye kadar değişen değerler alacak şekilde belirlemişler ve bir tek grafik yerine daha fazla sayıda “ $RI(t)$ – zaman” grafiği elde ederek, ortaya çıkabilecek



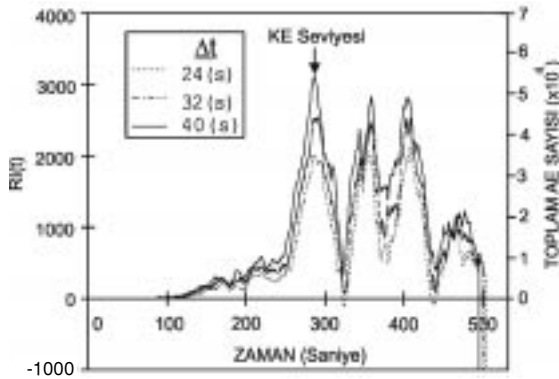
Şekil 3. “Toplam AE sayısı – zaman” grafiğinden AE sayısı artışının, $RI(t)$, belirlenmesi.

Figure 3. Determination of the Incremental AE count, $RI(t)$, from the “total AE count – time” plot.

hataların yorumlamadaki etkisini en aza indirmeye çalışmışlardır. Örneğin, bu çalışma kapsamında elde edilmiş olan Şekil 4'ten; 24, 32, 40 saniye zaman aralıklarıyla çizilen grafiklerde, 24 ve 32 saniye aralıklı çizilen AE sayısı artışlarının 3 doruk noktasında birbirlerine yakın olmasına karşın, 40 saniyede ise farklılık daha belirgin olarak görülmektedir.

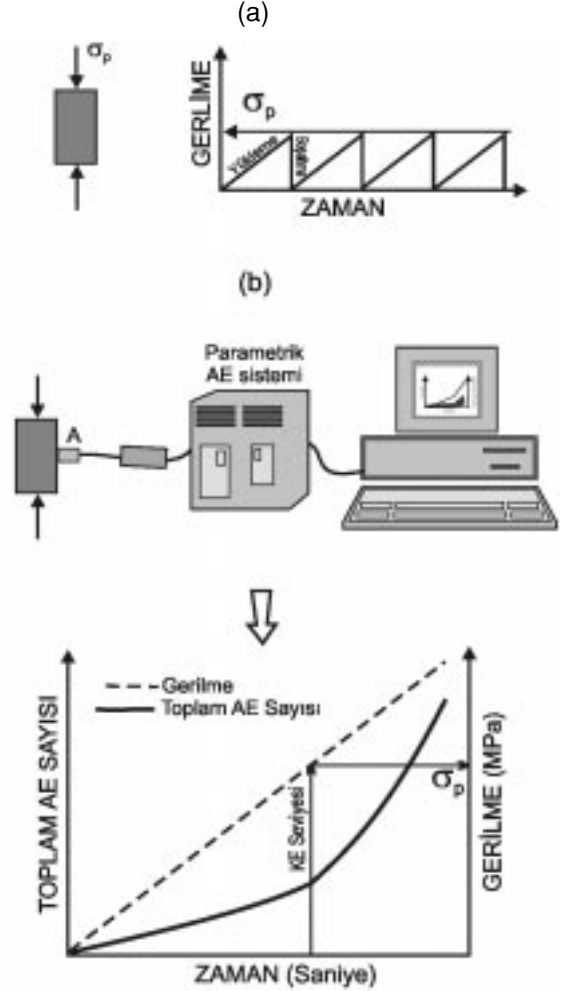
KE Seviyesinin Belirlenmesini Etkileyen Faktörler

AE yönteminde KE seviyesinin, dolayısıyla kayacın geçmişte etkisi altında kaldığı gerilme düzeyinin belirlenmesinde; kayaç türünün, kayaçın etkisinde bulunduğu gerilme ortamından alınıp AE deneyi yapıncaya kadar geçen sürenin (bekletme zamanı) ve örnek boyut etkisinin önemli olduğu bazı araştırmacılar tarafından (Hardy vd., 1989; Koerner ve Lord, 1989; Barr vd., 1992; Hardy ve Shen, 1992; Momayez ve Hassani, 1992; Seto vd., 1992 ve 1999; Barr vd., 1999; Shin vd., 2000; Park vd., 2001) laboratuvarında gerçekleştirilen AE deneyleriyle ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda, kayaç karot örneği üzerine etkileyen gerilme, laboratuvarında uygulanan ön yüklemelerle temsil edilmiş ve örnek tek eksenli yükleme koşulunda belirli bir gerilme seviyesine kadar yüklenmiş ve yük kaldırılmıştır (Şekil 5a). İkinci aşamada ise, tek eksenli yükleme koşulunda parametrik AE sistemi ile gerçekleştirilen deneyle (Şekil 5b) zamana karşı AE sayısı, toplam AE sayısı ve gerilme değerleri elde edilerek KE seviyeleri belirlenmiştir.



Şekil 4. Farklı zaman aralıkları (Δt) için 3 farklı "RI(t) – zaman" grafiğinin elde edilerek KE seviyesinin belirlenmesi.

Figure 4. Determination of KE level from "RI(t) – time" graph obtained for different time intervals (Δt).



Şekil 5. (a) Karot örneğine tek eksenli ön yükleme yapıp yükün tekrar boşaltılması ve (b) parametrik AE sistemi ile deney yapılarak elde edilen sonuçlardan KE seviyesinin belirlenmesi.

Figure 5. (a) Uniaxially pre-loading and unloading of core sample, and (b) determination of KE level from the results of the test carried out by parametric AE system.

Ayrıca ön yüklemeye uygulanan gerilme ile AE deneyinde belirlenen KE seviyeleri de karşılaştırılmıştır. Kayaç türleri, bekletme zamanları ve karot boyutları farklı olacak şekilde gerçekleştirilen bu deneylerde sert kayaçlarda olumlu sonuçlar alınırken, yumuşak kayaçlarda KE seviyesinin belirlenmesi daha güç olmuştur. Bekletme süresi arttıkça bu seviyenin belirlenmesi güçleşmiş ve karot boyutu ile kayacın etkisinde kaldığı gerilme seviyesi büyüdükçe KE seviyesinin belirlenebilme süresinin de arttığını gösteren sonuçlar elde edilmiştir.

Ayrıca Seto vd. (1992 ve 1999), KE seviyesinin bazen 1. yükleme çevriminde gözlenemediğini ancak 2. veya 3. yükleme çevrimi sırasında bu seviyenin belirlenebildiğini ifade etmişlerdir (Şekil 6). Bunun nedeninin ise, zaman etkisi olduğu ve bekletme zamanı arttıkça birinci yüklemdeki AE deneylerinde belirgin bir KE seviyesi gözlenmezken, 2. veya 3. yüklemde bu seviyenin belirlenebildiği adı geçen araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Seto vd. (1999), ön yükleme yapılmış karotlar üzerinde 7 yıl sonra gerçekleştirdikleri AE deneyleriyle KE seviyelerini kabul edilebilir bir farklılıkla belirleyebilmişlerdir.

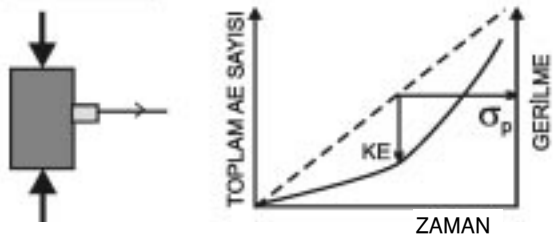
1. YÜKLEME



2. YÜKLEME



3. YÜKLEME

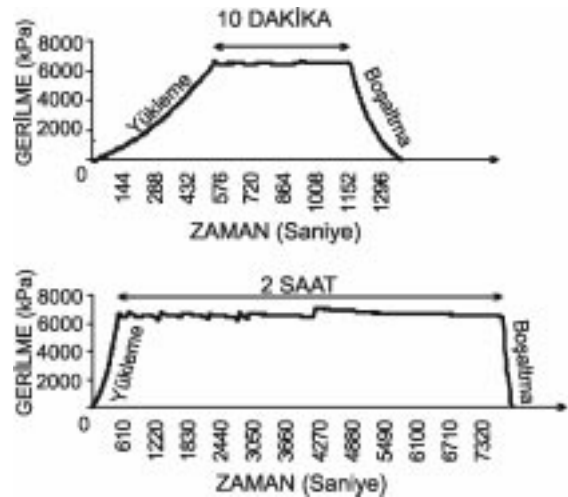


Şekil 6. Ön yükleme yapılmış karot örneklerinde gerçekleştirilen AE deneylerinde 1. yüklemde belirlenemeyen KE seviyesinin 2. ve 3. yüklemelerde belirlenmesi (Seto vd., 1992'den yeniden düzenlenmiştir)

Figure 6. Determination of the KE level, that could not be determined at 1st loading, at the 2nd and 3rd loading stages on the pre-loaded core samples (rearranged from Seto et al., 1992).

Bekletme zamanının etkisinin gösterilmesi amacıyla, Çizelge 1'de bu çalışma kapsamında elde edilmiş bazı sonuçlar verilmiştir. Bir kireçtaşı bloğundan hazırlanmış karotlar üzerinde 10 dakika ve 2 saat süreyle tek eksenli ön yükleme yapılmış (Şekil 7) ve daha sonra karotların üzerinden yük kaldırılarak 1, 15 ve 30 gün bekletilmişlerdir. Belirtilen bu sürelerde bekletilen karotlar üzerinde AE deneyleri gerçekleştirilerek KE seviyeleri belirlenmiştir (Çizelge 1). Seto vd. (1992)'nin belirttiği gibi, KE seviyeleri 2. yüklemelerden elde edilebilmiştir. 1. yüklemelerde kayda değer bir KE seviyesi gözlenmemiştir. Çizelge 1'den de görüleceği gibi, bekletme zamanı arttıkça KE seviyesinin belirlenmesindeki farklılık da artmaktadır. Ayrıca, ön yükleme süresi arttıkça farkların azaldığı belirlenmiş olup, kayaçların doğada etkisi altında kaldıkları gerilmelerin etki süresinin daha uzun olduğu gözönünde bulundurulduğunda, bu farklılığın daha da azalabileceği düşünülmektedir. Yazarlar, laboratuvarında ön yükleme koşullarında farklı kayaç türlerinin ve bekletme zamanının etkisini araştırmak amacıyla daha ayrıntılı bir çalışmayı başlatmış olmakla birlikte, çalışma halen devam ettiği için sonuçlarının bu yazıda sunulması mümkün olamamıştır.

AE yöntemi kullanılarak gerilmelerin belirlenmesinde en önemli tartışma konuları; AE'den belir-



Şekil 7. Kireçtaşı bloğundan hazırlanan karotlar üzerinde 10 dakika ve 2 saat süreyle ön yüklemelerin yapılıp boşaltılmasını gösteren grafikler.

Figure 7. The graphs showing the pre-loadings and unloadings, on the limestone cores, in 10 minutes and 2 hours

Çizelge 1. Laboratuvarında tek eksenli ön yüklemeye maruz bırakılmış ve farklı zamanlarda bekletilmiş karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenen KE seviyeleri ve farklılıklar.

Figure 1. Kaiser effects with their errors determined from the AE tests carried out on the cores which have been pre-loaded in the laboratory and waited for different span time.

Ön yükleme süresi	Ön yükleme seviyesi (kPa)		Bekletme süresi (gün)*	KE seviyesi (kPa)	F (%)
	Aralık	Ort.			
10 dak.	6380-6650	6513	1	7169	10.1
	6250-6600	6428	15	4420	31.2
2 saat	6450-6930	6599	1	6792	2.9
	6350-7210	6630	15	5855	11.7
	6430-6730	6530	30	5338	18.2

F: Farklılık (belirlenen KE seviyesinin ortalama ön yükleme seviyesinden olan yüzde farkı), *Ön yükleme ile AE deneyinin yapıldığı zamanlar arasındaki fark

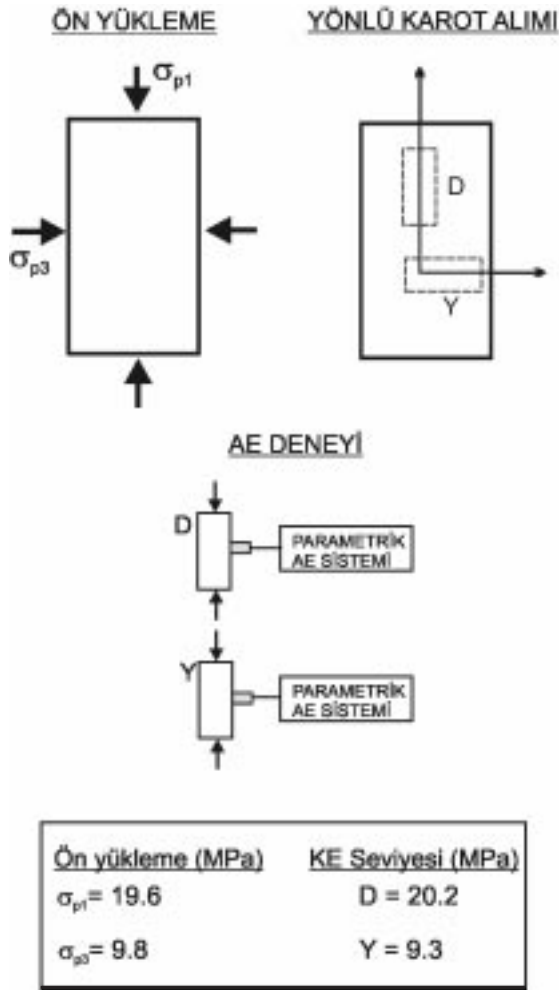
lenen gerilmelerin kayaçların jeolojik süreç boyunca etkisinde kaldıkları en büyük gerilmelere mi, yoksa güncel gerilmelere mi karşılık geldiği ve AE deneyinin tek eksenli koşullar altında yapılmasının uygun olup olmadığıdır. AE deneyinin tek eksenli yükleme altında yapılamayacağı ve kayacın doğada etkisinde kaldığı gerilme ortamının üç eksenli yükleme ortamına benzer olduğu, Holcomb (1983; Holcomb 1993'den), Holcomb ve Martin (1985) ve Hughson ve Crawford (1987) tarafından belirtilmiştir. Buna karşın, Watanabe vd. (1994) tarafından tuf karot örnekleri üzerinde üç eksenli ön yükleme yapılmıştır. Daha sonra bu örneklerden çıkartılan yönlü karotlar üzerinde tek eksenli yükleme ile gerçekleştirilen AE deneyleri sonucunda KE seviyesinin yön kavramından bağımsız olabileceği belirtilmiştir (Şekil 8). Bunun yanı sıra, arazi deneylerinden ve tek eksenli yükleme koşulunda gerçekleştirilen AE deneylerinden elde edilen gerilme değerleri karşılaştırıldığında (Tuncay ve Ulusay, 2002; bkz. Çizelge 1), bazı farklılıklar olmakla birlikte, sonuçların benzerlik taşıdıkları görülmektedir.. Kanagawa vd. (1981) de AE tekniğinden geçmişteki gerilmelerin mi yoksa güncel gerilmelerin mi belirlendiği sorusuna açıklık getirmek amacıyla, şev kazısı yapılmış bir lokasyonda gerilim boşaltma yöntemi (overcoring) ile AE'den elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır (Şekil 9). Araştırmacılar, AE'den elde edilen gerilme değerlerinin kazı yapılmadan önceki gerilmelere karşılık geldiğini, gerilim boşaltma yönteminden ise kazı sonrasında ait gerilmenin saptandığını belirtmişlerdir. Ancak bu araştırmacılar, şevin mevcut konumuna kaç yıl sonra getirildiğine yönelik bir bilgi vermemişlerdir. Kanagawa vd., (1981)'nin gerçekleştirdiği

bu çalışma ile AE yönteminden belirlenen gerilmelerin belirli bir zaman önce kayacın etkisinde kaldığı gerilmelere karşılık geldiği sonucu çıkmaktadır. Ancak bu sonuç, AE yöntemiyle jeolojik süreç boyunca en büyük gerilmelerin belirlendiği anlamına da gelmemektedir.

TÜRKİYE'DE ARAZİ GERİLMELERİNİN AE YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Bu çalışmada, AE yönteminin Türkiye'nin bazı yerlerinde arazi gerilmelerinin tayin edilmesi amacıyla yeraltı ve yerüstü işletmeleri, taş ocakları, tünel gibi kaya yapılarının ve kazılarının bulunduğu 20 farklı yerden yönlü kaya bloğu örnekleri alınmıştır. Örnekleme yerleri Şekil 10'da verilen Türkiye haritasında gösterilmiştir. Her bloktan laboratuvarında yönlü karotlar hazırlanmış (Şekil 11) ve her karot üzerinde ayrı ayrı AE deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriden, Watanabe ve Tano (1999) tarafından önerilen yöntem kullanılarak KE seviyeleri belirlenmiştir. Her kayaç bloğuna ilişkin açıklamalar, AE deneylerinde farklı yönler için belirlenen KE seviyeleri ve dolayısıyla gerilme değerleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneyleriyle her bir yön için saptanan gerilme değerlerinden (bkz. Çizelge 2) gerilme tansörünün belirlenebilmesi için öncelikle X, Y ve Z düzlemlerine (bkz. Şekil 11) etkiyen makaslama gerilmelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için öncelikle Eşitlik (2), (3) ve (4)'de verilen ilişkiler kullanılarak üç yöndeki makaslama gerilmeleri hesaplanmıştır. AE deneyleri için karotlar hazırlanırken, her bir düzlemdeki ana yönler

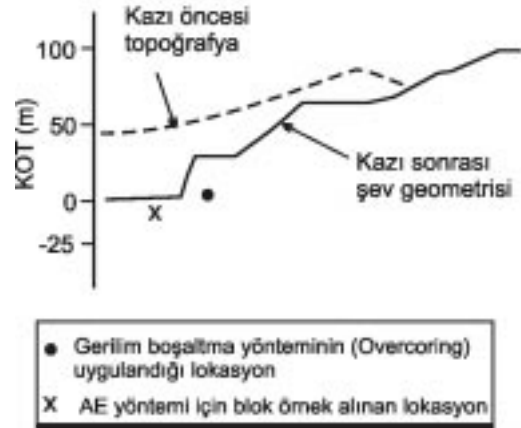


Şekil 8. Üç eksenli koşulda belirli gerilme değerlerine kadar ön yükleme uygulanmış büyük beton karot örneğinden alınan yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenen KE seviyelerinin karşılaştırılması (Watanabe vd., 1994) (σ_{p1} ve σ_{p3} : ön yüklemedeki asal gerilmeler, D: düşey, Y: yatay).

Figure 8. Comparison of the KE levels determined from AE tests on the oriented core specimens from the concrete block which was pre-loaded at certain stress levels in triaxial condition (Watanabe et al., 1994) (σ_{p1} and σ_{p3} : principal stresses at preloading, D: vertical, Y: horizontal).

(örneğin, X ve Y; bkz Şekil 11) ile ara yönler (örneğin, XY; bkz Şekil 11) arasındaki açının 45° olarak seçilmesi Eşitlik (2), (3) ve (4)'te verilen ilişkileri sadeleştirdiğinden kolaylık sağlamaktadır.

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\sin 2\theta} [\sigma_{XY} - (\sigma_{xx} \cdot \cos^2 \theta + \sigma_{yy} \cdot \sin^2 \theta)] \quad (2)$$



Şekil 9. Bir sahada AE deneyi için örneğin alındığı ve gerilim boşaltma yönteminin (overcoring) uygulandığı yerler ve kazı öncesi ile sonrasına ait şev geometrisi (Kanagawa vd., 1981).

Figure 9. The locations of the overcoring test and the blocks taken for AE test at a site, and the slope geometries before and after excavation.

$$\tau_{xz} = \frac{1}{\sin 2\theta} [\sigma_{XZ} - (\sigma_{xx} \cdot \cos^2 \theta + \sigma_{zz} \cdot \sin^2 \theta)] \quad (3)$$

$$\tau_{yz} = \frac{1}{\sin 2\theta} [\sigma_{YZ} - (\sigma_{yy} \cdot \cos^2 \theta + \sigma_{zz} \cdot \sin^2 \theta)] \quad (4)$$

Burada;

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: Makaslama gerilmeleri

$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$: X, Y ve Z yönündeki normal gerilmeler

$\sigma_{XY}, \sigma_{XZ}, \sigma_{YZ}$: XY, XZ ve YZ yönündeki normal gerilmeler

Gerilme tansörü (Eşitlik 5) simetrik olduğu için, hesaplanan makaslama gerilmeleri ile tüm gerilme bileşenlerini ifade etmek mümkün olmaktadır.

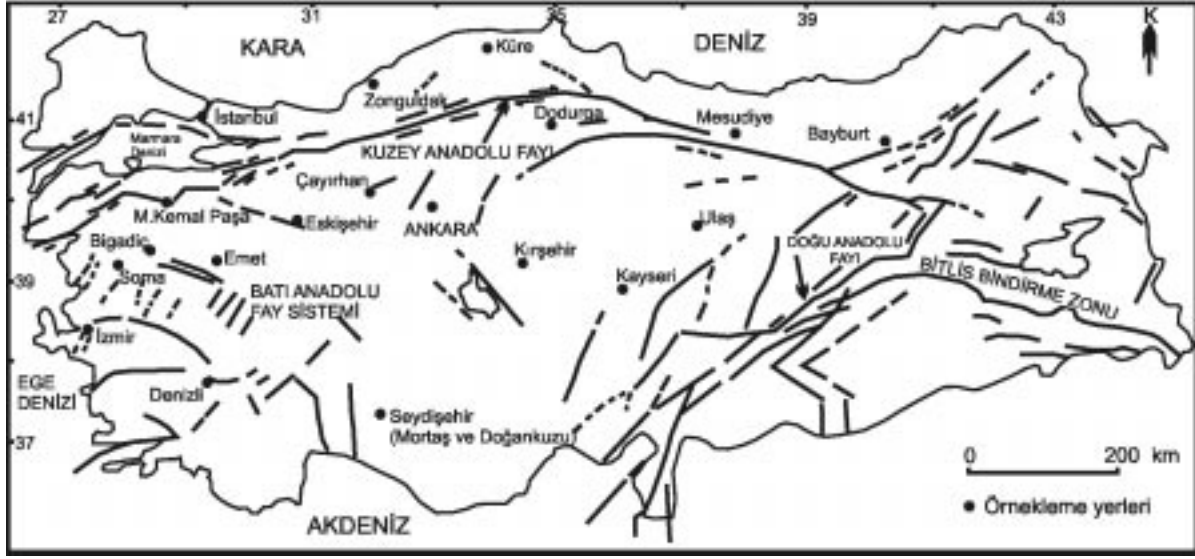
$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Elde edilen gerilme tansöründen yararlanılarak asal gerilmelerin bulunması için Eşitlik (6)'da verilen matrisin determinantının sıfır olması gerekmektedir.

Çizelge 2. Türkiye’de farklı yerlerden alınan kaya bloklarının bazı özellikleri ve bu bloklardan hazırlanan yönlü karotlar üzerinde gerçekleştirilmiş AE deneylerinden belirlenen KE seviyeleri (gerilme değerleri).
Figure 2. Some properties of the rock blocks sampled from different locations in Turkey, and KE levels (stress values) determined from AE tests on the oriented cores.

Yeri	Kayaç türü	σ_c (MPa)	D (m)	γ (kN/m ³)	σ_{ov} (MPa)	Yönlü karotlardan elde edilen gerilmeler (MPa)		F (%)
						X=	Y=	
Eynez ⁺ (Soma)	Marn	70	177	23	4.07	X= 2.00	XY= 2.15	8.8
						Y= 2.77	YZ= 3.51	
						Z= 4.43	ZX= 4.25	
Bornova ⁺ (İzmir)	Andezit	59	80	23.3	1.86	X= 1.70	XY= 1.74	29.6
						Y= 2.14	YZ= 1.85	
						Z= 2.41	ZX= 3.56	
Çayırhan ⁺ (Ankara)	Kumtaşı	36	223	20	4.46	X= 4.85	XY= 4.22	5.4
						Y= 4.25	YZ= 4.82	
						Z= 4.22	ZX= 3.56	
Küre ⁺	Bazalt	78	81	26.7	2.16	X= 3.54	XY= 4.00	114
						Y= 3.91	YZ= 4.26	
						Z= 4.64	ZX= 4.55	
Dodurga ⁺ (Çorum)	Kilitaşı	42	252	22	5.54	X= 4.45	XY= 4.48	11.6
						Y= 4.31	YZ= 4.87	
						Z= 4.90	ZX= 4.68	
Zonguldak ⁺	Kumtaşı	98	505	25.8	13.03	X= 12.62	XY= 10.78	9.2
						Y= 9.76	YZ= 10.03	
						Z= 11.83	ZX= 12.27	
İstanbul ^b	Kumtaşı-silttaşı		60	26	1.56	X= 1.16	XY= 1.20	7.1
						Y= 1.28	YZ= 1.53	
						Z= 1.45	ZX= 1.86	
Ankara ^a	Kireçtaşı	150	10	26.3	0.26	X= 0.30	XY= 0.34	42
						Y= 0.25	YZ= 0.25	
						Z= 0.37	ZX= 0.42	
Bayburt ^a	Kireçtaşı	62.7	15	24.7	0.37	X= 0.71	XY= 0.77	135
						Y= 1.18	YZ= 0.97	
						Z= 0.87	ZX= 0.75	
Denizli ^a	Traverten	23.8	23	22.2	0.51	X= 0.91	XY= 0.86	41.2
						Y= 0.76	YZ= 0.79	
						Z= 0.72	ZX= 0.79	
Kırşehir ^a	Kireçtaşı	73.8	28	26.1	0.73	X= 1.05	XY= 0.90	19.2
						Y= 1.08	YZ= 0.91	
						Z= 0.87	ZX= 0.92	
Ulaş ^b (Sivas)	Kireçtaşı	123.4	25	26.6	0.66	X= 1.35	XY= 1.15	74.2
						Y= 1.16	YZ= 0.98	
						Z= 1.15	ZX= 1.13	
Bigadiç [*] (Balıkesir)	Marn	11.3	70	20.1	1.41	X= 1.86	XY= 1.89	5.7
						Y= 1.62	YZ= 1.02	
						Z= 1.49	ZX= 1.38	
Kestelek [*] (M. Kemal Paşa-Bursa)	Kireçtaşı	34.4	50	24.2	1.21	X= 1.81	XY= 1.65	11.6
						Y= 1.36	YZ= 1.66	
						Z= 1.07	ZX= 1.31	
Sultandere ^a (Eskişehir)	Kireçtaşı	48.8	10	26.3	0.26	X= 0.41	XY= 0.38	26.9
						Y= 0.34	YZ= 0.28	
						Z= 0.33	ZX= 0.20	
Doğankuzu [*] (Seydişehir-Konya)	Kireçtaşı	99.6	100	26.7	2.62	X= 4.31	XY= 2.58	13.7
						Y= 3.14	YZ= 2.36	
						Z= 2.98	ZX= 3.81	
Mortaş [*] (Seydişehir-Konya)	Kireçtaşı	80.1	90	26.6	2.39	X= 2.85	XY= 3.25	6.3
						Y= 2.78	YZ= 3.00	
						Z= 2.54	ZX= 3.00	
Mesudiye ^b (Ordu)	Siyenit	68.3	200	25.1	5.02	X= 6.60	XY= 8.56	6.6
						Y= 6.54	YZ= 7.09	
						Z= 5.35	ZX= 8.36	
Emet [*] (Kütahya)	Kireçtaşı	81.3	45	25.4	1.14	X= 1.08	XY= 1.17	6.1
						Y= 1.46	YZ= 1.54	
						Z= 1.07	ZX= 1.54	
Kayseri ^a	Bazalt	107.2	20	26.4	0.53	X= 0.60	XY= 0.60	11.3
						Y= 0.62	YZ= 0.62	
						Z= 0.59	ZX= 0.60	

⁺Yeraltı maden işletmesi, ^bTünel, ^aTaş ocağı, *Açık maden işletmesi, σ_c : Tek eksenli sıkışma dayanımı, D: Kaya bloğunun alındığı derinlik, γ : Birim hacim ağırlık, σ_{ov} : Örtü gerilmesi, F: AE deneylerinden düşey yönde (Z) belirlenen gerilmenin örtü gerilmesine göre yüzde farkı



Şekil 10. Bu çalışmada AE ölçümlerinde kullanılmak üzere alınmış kaya bloklarının örnekleme yerleri ve Türkiye'nin başlıca tektonik özellikleri.

Figure 10. Sampling locations of the block samples employed in Acoustic Emission (AE) measurements in this study, and major tectonic features of Turkey.

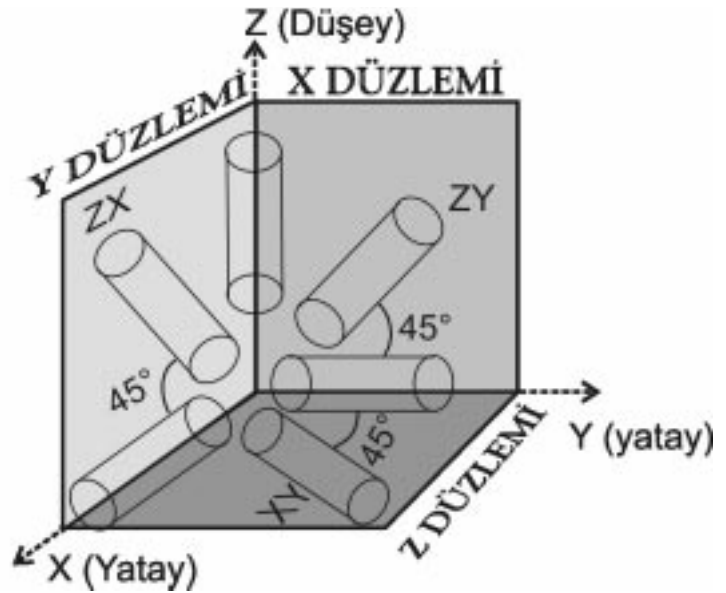
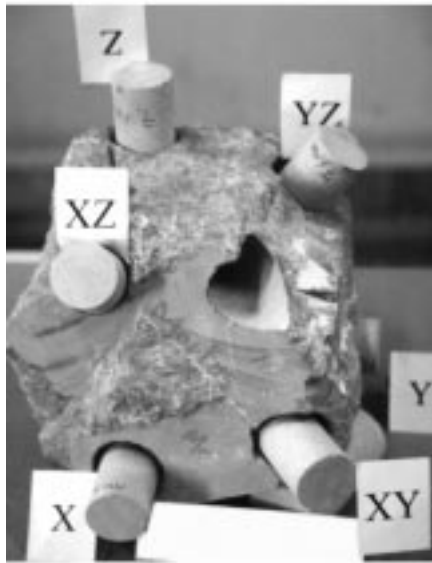
$$\begin{vmatrix} \sigma_{xx} - \sigma^* & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma^* & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma^* \end{vmatrix} = 0 \quad (6)$$

tedir (Eşitlik 7). Bu denklemde I_1 , I_2 ve I_3 gerilme tansörünün sırasıyla birinci, ikinci ve üçüncü değişmezleri olup, denklemin kökleri asal gerilmelere (σ^*) karşılık gelmektedir.

$$(\sigma^*)^3 - I_1(\sigma^*)^2 + I_2\sigma^* - I_3 = 0 \quad (7)$$

Bu matrisin determinantı alındığında, gerilme tansörünün karakteristik denklemi elde edilmek-

Belirlenen her bir asal gerilme için,



Şekil 11. Blok örneklerden yönlü karotların hazırlanması

Figure 11. Preparation of the oriented cores from block samples

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma^* & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma^* & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma^* \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$(l^*)^2 + (m^*)^2 + (n^*)^2 = 1 \quad (9)$$

ilişkilerinden yararlanılarak Eşitlik (10)'da verilen doğrultu (yönelti) kosinüs matrisinin tüm bileşenleri belirlenmektedir.

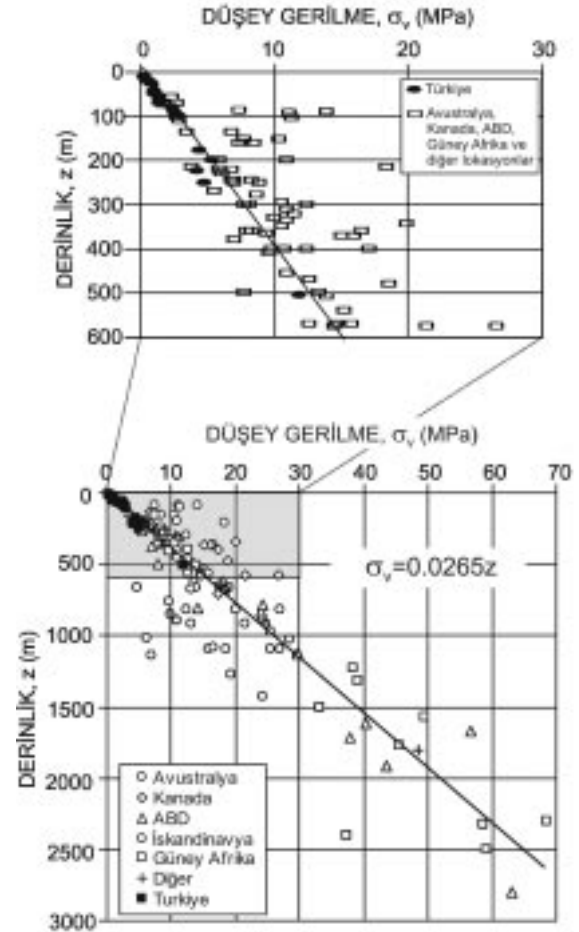
$$\begin{bmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & m_{z'} & n_{z'} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Doğrultu kosinüs matrisinden [A] yararlanılarak, AE deneyinin yapıldığı eksen takımı ile asal gerilmelerin yönleri arasındaki açılar belirlenmesi mümkündür. Yatay düzlemdeki en büyük ve en küçük asal gerilmeler ve yönleri ise, AE deneylerinde X, Y ve XY yönlerinde alınmış karotlar için elde edilen gerilme değerleri kullanılarak ve yukarıda değinilen üç boyutlu çözümleme yerine iki boyutlu bir çözümlemeyle saptanabilmektedir.

Çizelge 2 incelendiğinde, birkaçı dışında, AE deneylerinden Z yönünde (düşey yönde) belirlenen gerilme değerleri ile kayacın birim hacim ağırlığı ve örneğin alındığı derinliğe bağlı olarak hesaplanan örtü tabakası gerilmesi değerlerinin bazılarının benzer oldukları görülmektedir. Ancak, bazılarında %40 ile %135'e ulaşan farklılıklar bulunmuştur. Bu farklılıkların oluşmasında, daha önceki bölümlerde değinildiği gibi, kayacın sertliğinin ve etkisinde kaldığı gerilmenin düşük olmasının yanı sıra, hesaplanan örtü tabakası gerilmesi değerindeki olası hataların etkili olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, taş ocakları ile bazı açık işletmelerde yapılan patlatma ve kazı işlemlerinin etkisiyle buralardaki blokların yapısının etkilenmiş olabileceği gözardı edilmemelidir. Bu durumun AE mekanizmasını da etkileyeceği ve özellikle taş ocaklarından alınmış söz konusu örnekler için AE deneyiyle belirlenen gerilmelerin birincil gerilme olarak yorumlanmasının tartışmalı olacağı dikkate alınmalıdır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen AE deneylerinden her örnekleme yeri için belirlenen asal gerilmeler, en büyük ve en küçük yatay gerilmeler ile bunların yönleri Çizelge 3'te verilmiş-

tir. Aynı yerlerde gerilmeyi belirlemek amacıyla arazide yapılmış başka deney bulunmadığından, AE deneyiyle elde edilen asal gerilmelerin diğer arazi deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılması da mümkün olamamıştır. Bununla birlikte, dünyanın farklı bölgelerinde gerçekleştirilen arazide gerilme tayin deneylerinden elde edilen düşey ve yatay gerilmeler Hoek ve Brown (1980) tarafından derlenmiş olup, bu çalışmada karşılaştırma amacıyla bu veriden yararlanılmıştır. Bu verilerle birlikte bu çalışmada AE yönteminde elde edilen sonuçlar kullanılarak hazırlanan düşey gerilmenin derinlikle değişimi Şekil 12'de verilmiştir. Şekil 12'de, AE'den elde



Şekil 12. Hoek ve Brown (1980) tarafından derlenmiş dünyanın çeşitli yerlerindeki düşey gerilmeler ile bu çalışmada AE'den belirlenen düşey gerilmelerin derinlikle değişimi.

Figure 12. Variation of the vertical stresses with depth compiled from the different locations of the world by Hoek and Brown (1980) and determined from the AE tests in this study.

Çizelge 3. Türkiye’de kaya bloklarının alındığı değişik yerler için hesaplanan asal gerilmeler, en büyük ve en küçük yatay gerilmeler ve yönleri

Figure 3. The principal stresses, maximum and minimum horizontal stresses and their directions for the different sampling locations in Turkey.

Yeri	σ_1 (MPa)	y_1	e_1^* (°)	σ_2 (MPa)	y_2	e_2^* (°)	σ_3 (MPa)	y_3	e_3^* (°)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	y_H (°)
Eynez	4.82	093	69	2.79	003	8	1.58	270	20	2.84	1.93	354.3
İzmir	3.72	146	50	2.03	045	9	0.50	308	39	2.20	1.64	012.4
Çayırhan	5.81	297	36	4.11	032	6	3.40	130	54	5.00	4.10	293.9
Küre	4.80	058	67	4.00	177	14	3.26	278	18	4.06	3.39	013
Dodurga	5.00	010	68	4.48	254	10	4.18	161	10	4.50	4.26	062.5
Zonguldak	12.7	141	12	12.03	265	68	9.47	047	24	12.68	9.70	318
İstanbul	1.89	342	52	1.28	075	1	0.70	165	38	1.28	1.16	260.8
Ankara	0.43	297	59	0.33	055	16	0.16	153	26	0.34	0.21	290.5
Bayburt	1.25	015	6	0.88	130	75	0.64	284	14	1.24	0.65	249.5
Denizli	0.92	188	4	0.79	283	33	0.68	089	56	0.91	0.76	194.7
Kırşehir	1.24	091	4	0.96	184	40	0.80	357	50	1.23	0.90	006.8
Sivas	1.41	283	16	1.33	176	42	0.92	029	43	1.40	1.11	293.9
Bigadiç	2.31	249	36	1.66	147	16	1.00	038	50	1.93	1.55	088.1
Kestelek	1.83	260	11	1.68	357	35	0.72	155	53	1.82	1.34	069.5
Eskişehir	0.55	185	39	0.34	279	5	0.18	015	51	0.41	0.34	348
Seydişehir (Doğankuzu)	5.14	070	14	3.20	180	53	2.11	331	33	5.01	2.44	067.5
Seydişehir (Mortaş)	3.47	341	26	2.40	241	21	2.31	117	56	3.25	2.38	342.4
Ordu	9.96	357	29	5.06	104	27	3.46	229	48	8.56	4.58	351.4
Emet	1.66	034	38	1.42	141	20	0.54	252	45	1.49	1.06	360
Kayseri	0.62	336	17	0.61	075	25	0.58	216	59	0.62	0.60	147.5

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: Asal gerilmeler; σ_H, σ_h : En büyük ve en küçük yatay gerilmeler, y_1, y_2, y_3 : Asal gerilmelerin eğim yönleri, e_1, e_2, e_3 : Asal gerilmelerin eğimleri, y_H : En büyük yatay gerilmelerin doğrultusu,

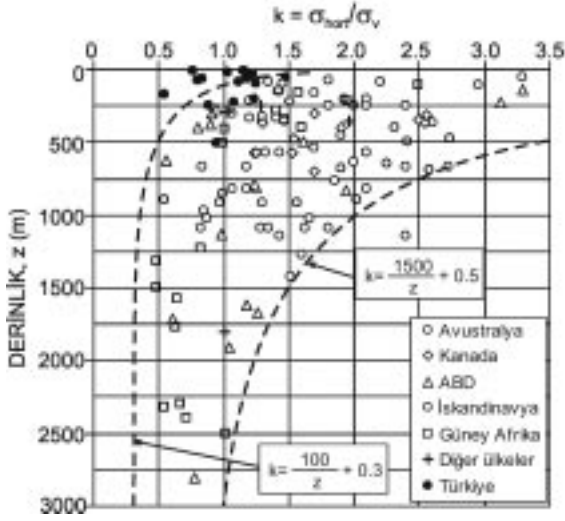
*Asal gerilmelerin eğimleri üst yarımküre için belirlenmiş olup, açılar yataydan yukarıya doğru verilmiştir.

edilen düşey gerilmelerin Hoek ve Brown (1980) tarafından derlenen verilerle uyum sağladığı görülmektedir. Ayrıca, ortalama yatay gerilmenin düşey gerilmeye oranı olan “k” katsayısının derinliğe bağlı değişimi Şekil 13’te verilmiştir. Bu şekilden görüleceği gibi, veriler oldukça geniş bir aralıkta dağılım göstermektedir. Hoek ve Brown (1980) bu verileri derlerken, topoğrafyanın ani değişimler göstermediği bölgelerde yapılmış arazi deneylerinin sonuçlarını seçmişler ve topoğrafyanın oldukça değişken olduğu böl-

gelerde verilerin daha da farklı olabileceğini belirtmişlerdir. AE deneyleriyle Türkiye’deki farklı yerler için belirlenen “k” katsayılarının Şekil 13’teki verilerin alt sınırına yakın konumda bulunduğu görülmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerilme ortamının doğru ifade edilebilmesi için gerilme tansörünün tüm bileşenlerinin belirlenmesi gerekir. Gerilme tansörünün tüm bileşenle-



Şekil 13. Hoek ve Brown (1980) tarafından derlenmiş veri ve bu çalışmada elde edilen sonuçlar kullanılarak hazırlanmış olan ortalama yatay gerilmelerin derinlikle değişimini gösteren grafik

Figure 13. The graph showing the variation of the average horizontal stresses with depth based on the data compiled from the different locations of the world by Hoek and Brown (1980) and determined from the AE tests in this study.

rinin belirlenmesi; yassı kriko ve gerilim boşaltma deneyleri ile topoğrafya etkisinin söz konusu olmadığı derinlikler için hidrolik çatlatma deneyi aracılığıyla ve ayrıca fay çizikleri yöntemi ve AE tekniği ile mümkün olmaktadır. Gerilme ölçme yöntemlerinin çoğunda bazı varsayımlar yapılırken, AE tekniğinde kayacın özelliklerine veya gerilme bileşenlerine ilişkin herhangi bir varsayımda bulunulmamasına rağmen, KE ile ilgili bazı varsayımlar söz konusudur.

Türkiye’de değişik yerlerden alınan örnekler üzerinde yapılan AE deneylerinden elde edilen düşey gerilmelerin bazıları, kuramsal olarak hesaplanan örtü tabakası gerilmeleriyle benzer iken, bazılarının, özellikle taş ocaklarından alınan örneklerle ait olanların ise oldukça farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Yazarlar, bu farklılıkların muhtemelen örnekleme yapılan taş ocaklarının sığ derinliklerde olmasından, patlatma ve kazı işlemleri nedeniyle alınan blokların yapısının etkilenmiş olabileceğinden kaynaklandığını düşünmektedirler. Taş ocakları dışındaki yerlerden elde edilen sonuçlardaki bazı önemli farklılıklar ise, örtü tabakası gerilmesi değerindeki ve konumlandırma sırasındaki olası hatalardan

kaynaklanmış olabilir. AE yönteminden Türkiye’deki bazı yerler için elde edilen ortalama yatay gerilmelerin düşey gerilmelere oranları (k) ise, dünyanın çeşitli bölgeleri için arazide gerilim tayini deneyi sonuçlarından derlenen veriler ile karşılaştırılmıştır. Türkiye’den elde edilen verilerin dünyanın çeşitli bölgeleri için derlenen verilerin dağılımının alt sınırına yakın konumda çıktığı görülmüştür.

AE tekniğinin arazi deneylerine oranla çok daha kolay ve daha az maliyetli olması, yöntemi cazip hale getirmektedir. Bununla birlikte, yöntemin içerdiği bazı belirsizliklerin giderilmesi için daha ayrıntılı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu açıdan, Türkiye’nin değişik yerlerinde AE ve diğer tekniklerle gerilme ölçümlerinin yapılması ve sonuçlarının karşılaştırılması önem taşımaktadır. Böylelikle kaya mühendisliği uygulamaları için Türkiye’de eksikliği duyulan arazi gerilmesi ile ilgili veri tabanı geliştirilecektir. Ayrıca AE ve diğer gerilme ölçüm teknikleriyle ilgili sınırlamalar ve avantajlar konusunda bilimsel yönden de katkı sağlanabilecektir.

KATKI BELİRTME

Yazarlar, makaleyle ilgili olarak görüş ve önerilerinden yararlandıkları Prof. Dr. Hasan Gerçek ve Prof. Dr. Erdal Ünal’a teşekkür ederler.

KAYNAKLAR

- Anderson, E.M., 1951. The Dynamics of Faulting. Oliver and Boyd, Edinburg, 191pp.
- Angelier, J., 1975. Sur l’analyse de medures recueillies dans des sites failles: l’utilite d’une confrontation entre les methodes dynamiques et cinematiques. C.R. Acad. Sci., Paris, D281, 1805-1808.
- Angelier, J., 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. Journal of Geophysical Research, 89(B7), 5834-5848.
- Amadei, B., and Stephansson, O., 1997. Rock Stress and Its Measurement. Chapman, and Hall, London, 490pp.
- Aydan, Ö., 2000a. GPS ölçümlerine dayanılarak Türkiye’nin yıllık birim deformasyon ve gerilim hızı dağılımı üzerine bir çalışma. Yerbilimleri, 22, 21-32.
- Aydan, Ö., 2000b. Fay çiziklerinden yerkabuğuna etkileyen gerilmelerin saptanması için yeni bir yöntem ve uygulaması. Yerbilimleri, 22, 223-236.

- Aydan, Ö. ve Paşamehmetoğlu, A.G., 1994. Dünya'nın çeşitli yörelerinde ölçülmüş yerinde gerilimler ve yatay gerilim katsayısı. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 10, 1-17.
- Aydan, Ö., and Kim, Y., 2002. The inference of crustal stresses and possible earthquake faulting mechanism in Shizuoka Prefecture from the striations of faults. *Journal of the School of Marine Science and Technology, Tokai University, No.54* (baskıda).
- Aydan, Ö., Kumsar, H., and Ulusay, R., 2000. The implications of crustal strain-stress rate variations computed from GPS measurements on the earthquake potential of Turkey. *Proceedings of the International Conference of GIS on Earth Science and Applications, 2nd ICGESA'2000, Menemen, İzmir, Bildiriler CD'si*, 14s.
- Aydan, Ö., Ulusay, R., Tuncay, E., Kumsar, H., Yılmazoğlu, M. ve Yüzer, E., 2001. Batı Anadolu'nun etkin gerilim ortamı. *JEOTEKNİK-III, İzmir ve Çevresinin Deprem ve Jeoteknik Sempozyumu, İzmir, Ö. Orhun ve Y. Tuner (eds.), Bildiriler CD'si*, 14 s.
- Barr, S.P., Pine, R.J., and Jupe, A.J., 1992. A study of the time dependency of the Kaiser effect in the Carnmenellis granite, Cornwall, UK. *Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, 175-182.
- Barr, S.P., Jupe, A., and Hunt, D.P., 1999. The Kaiser effect for samples pre-stressed at 820 m and 2.4 km with stress tensor results. *Proceedings of the ISRM International Congress on Rock Mechanics, Paris, G. Vouille and P. Berest (eds.), Vol. 2*, 1133-1136.
- Bott, M.H.P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological Magazine, XCVI(2)*, 11-12.
- Byerlee, J., 1978. Friction of rocks. *Pure Applied Geophysics*, 116, 615-626.
- Hardy, H.R.Jr., Zhang, D., and Zelanko, J.C., 1989. Recent studies of the Kaiser effect in geologic materials. *Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), State College, PA, Trans. Tech.Publications*, 27-55.
- Hardy, H.R.Jr., and Shen, W., 1992. Recent Kaiser effect studies on rock. *Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, 149-157.
- Hayashi, M., 1979. Discussion: Acoustic emission to detect the geostress. *Proceedings of the 4th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreux, Vol. 3*, 230-231.
- Hayashi, M., Kanagawa, T., Hibino, S., Motojima, M., and Kitahara, Y., 1979. Detection of anisotropic geo-stresses trying by acoustic emission, and non-linear rock mechanics on large excavating caverns. *Proceedings of the 4th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreux, Vol. 2*, 211-218.
- Hoek, E., ve Brown, E. T., 1980. *Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London*, 527pp.
- Holcomb, D.J., 1993. General theory of the Kaiser effect. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanic Abstracts*, 30(7), 929-935.
- Holcomb, D.J., and Martin, R.J., 1985. Determining peak stress history using acoustic emissions. *Proceedings of the 26th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, E. Ashworth (ed.), A.A. Balkema*, 715-722.
- Hughson, D.R., and Crawford, A.M., 1987. Kaiser effect gauging: The influence of confining stress on its response. *Proceedings of the 6th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreal, G.Herget and S. Vongpaisal (eds.), Vol. 2*, 981-985.
- Kanagawa, T., Hayashi, M., and Kitahara, Y., 1981. Acoustic emission and overcoring methods. *Proceedings of the International Symposium on Weak Rock, Tokyo*, 1205-1210.
- Kim, K., and Franklin, J. A., 1987. Suggested methods for rock stress determination. *International Journal of Rock Mechanics Mining Science and Geomechanic Abstracts*, 24(1), 53-74.
- Koerner, R.M., and Lord, A.E., 1989. AE detection of prestress in soil and rock. *Proceedings of the 4th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans Tech Publications*, 73-86.
- McKenzie, D.P., 1969. The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 59(2), 591-601.
- Momayez, M., and Hassani, F.P., 1992. Application of Kaiser effect to measure in-situ stresses in underground mines. *Proceedings of the 33rd US Symposium, Rock Mechanics, Santa Fe, J.R. Tillerson and W.R. Wawersik (eds.), A.A. Balkema*, 979-988.

- Momayez, M., Hassani, F.P., and Hardy, H.R.Jr., 1992. Maximum curvature method: A technique to estimate Kaiser-effect load from acoustic emission data. *Journal of Acoustic Emission*, 10(3/4), 61-65.
- Park, P., Park, N., Hong, C., and Jeon, S, 2001. The influence of delay time and confining pressure on in-situ stress measurement using AE and DRA. *Proceedings of the 38th US Symposium, Rock Mechanics in the National Interest*, Washington, D. Elsworth, J.P. Tinucci and K.A. Heasley (eds.), Swets & Zeitlinger Lisse, 1281-1284.
- Seto, M., Utagawa, M., and Katsuyama, K., 1992. The estimation of pre-stress from AE in cyclic loading of pre-stressed rock. *Proceedings of the 11th International Acoustic Emission Symposium, Progress in Acoustic Emission VI*, T. Kishi, K. Takahashi and M. Ohtsu (eds.), Fukuoka, The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 159-166.
- Seto, M., Nag, D.K., and 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.
- Shen, W., 1995. Objective Kaiser stress evaluation in rock. *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, 177-195.
- Shin, K., Oikawa, Y., and Ito, H., 2000. Consideration on DSCA and AE methods for stress measurement by comparing with corediscing information and others. *Journal of The Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol. 116, 965-971 (Japonca).
- Sugawara, K., and Obara, Y., 1995. Rock stress and rock stress measurements in Japan. *Proceedings of International Workshop on Rock Stress Measurements at Great Depth*, Tokyo, K. Matsuki and K Sugawara (Coordinators), 1-6.
- Sugawara, K., and Obara, Y., 1999. Draft ISRM suggested method for in-situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36, 307-322.
- Tuncay, E. ve Ulusay, R. 2002. Akustik Emisyon (Yayıma) (AE) tekniği: 1- AE'nin temel ilkeleri ve kaya mühendisliğindeki uygulama alanları. *Yerbilimleri*, 25, sayfa no.65-82.
- Watanabe, H., and Tano, H., 1999. In-situ stress estimation of Cappadocia region using the increment of AE event count rate. *Journal of College of Engineering, Nihon University*, 41(1), 35-42 (Japonca).
- Watanabe, H., Tano, H., and Akatsu, T., 1994. Fundamental study on pre-stress measurement of triaxial compressed rock. *Journal of College of Engineering, Nihon University*, 35(A), 11-19 (Japonca).
- Watanabe, H., Tano, H., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. Initial stress state in Cappadocia. *Japan-Korea Rock Engineering Symposium*, K. Matsui and H. Shimada (eds.), Fukuoka, Japan, 113-124.
- Yoshikawa, S., and Mogi, K., 1981. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression. *Tectonophysics*, 74, 323-339.
- Yoshikawa, S., and Mogi, K., 1990. Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity – A possibility for estimation of rock stress. *Journal of Acoustic Emission*, 8(4), 113-123.