



Akustik Emisyon (Yayıma) (AE) tekniği: 1. AE'nin temel ilkeleri ve kaya mühendisliğindeki uygulama alanları

Acoustic Emission (AE) technique: 1. Basic principles and its areas of application in rock engineering

Ergün TUNCAY, Reşat ULUSAY

Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 06532 Beytepe, ANKARA

ÖZ

Akustik Emisyon (Yayıma) (AE) tekniği, özellikle 1970'li yıllardan bu yana, kaya mühendisliğinde yeraltı ve yerüstü yapılarının duraylılığının izlenmesi ve yerkabuğundaki gerilmelerin belirlenmesi amacıyla ABD, Kanada, Japonya ve Avrupa ülkeleri başta olmak üzere, bir çok ülkede kullanılan ve üzerinde araştırma yapılan bir yöntem olmuştur. AE tekniği, yeraltında depolama çalışmalarında, yeraltı açıklıklarında karşılaşılan kaya ve grizu patlaması, aşırı sökülme, tavan çökmesi vb. gibi duraysızlıkların önceden kestiriminde ve duraysızlıkların oluşacağı olası yerlerin belirlenmesinin yanı sıra, şev duraysızlıklarının izlenmesinde de kullanılmaktadır. Ayrıca, yeraltı yapılarının tasarımında ve depremlerin yorumlanmasında oldukça önemli bir yeri olan arazi gerilmelerinin belirlenmesinde de kullanılan AE tekniği, hidrolik çatlatma, gerilim boşaltma, gerilim dengeleme vb. gibi yerinde deney yöntemlerine oranla, oldukça pratik ve daha az maliyetli bir yöntemdir. Yöntemin Türkiye'de yeterince tanınmamakta ve uygulanmamakta olduğu dikkate alınarak, bu yazıda AE tekniğinin ilkeleri ile kaya mühendisliğindeki kullanım alanlarının tartışılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, AE tekniğinin kısaca gelişimi, AE sinyallerinin (olgusunun) özellikleri, izleme sistemlerinin amaca göre kullanımı ve sınırlamaları, AE parametreleri, yöntemin yeraltı yapılarının ve şev duraysızlıklarının izlenmesinde ve arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanımı üzerinde durulmuş ve yöntemin avantaj ve dezavantajları ana hatlarıyla tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Akustik Emisyon (Yayıma) (AE), arazi gerilmesi, duraylılık, izleme ve kontrol, kaya patlaması.

ABSTRACT

The acoustic emission (AE) method is a technique which is being used in rock engineering in order to monitor the stability of underground and surface structures and to estimate in-situ crustal stresses in many countries such as US, Canada, Japan and European countries, particularly since 1970's. The AE technique is employed for predicting instabilities occurring in underground openings, such as rock bursts, gas outbursts, overbreak and roof failures, in the determination of possible source locations of such instabilities and to monitor slope movements. The technique, which is also used in estimation of in-situ stresses necessary for the assessment of earthquakes, is more practical and cheaper when compared to in-situ stress measurement techniques such as hydraulic fracturing, overcoring, stress compensating methods, etc. By considering the fact that the AE method is not commonly known and has not been applied in Turkey, in this study it is aimed to discuss the principles of the AE method and its applications in rock engineering. For this purpose, a brief history of its development, characteristics of the AE signals (events), the use of AE monitoring devices for different purposes, AE parameters, and its application in monitoring of instabilities in underground openings, slopes, and in-situ stress measurements are reviewed. Finally, advantages and disadvantages of the method are briefly discussed.

Key words: Acoustic Emission (AE), in-situ stress, stability monitoring and control, rock burst.

GİRİŞ

Kayaç, metal, seramik, beton, cam ve hatta buz gibi bir çok katı malzemenin gerilme etkisi altında kaldıklarında ve/veya deformasyona uğradıklarında yaydıkları titreşimlere “Akustik Emisyon (AE)” veya “Mikrosismik Aktivite”, bu titreşimlerin uygun düzenekler aracılığıyla algılanıp mühendislik amaçları doğrultusunda kullanılmasına da “Akustik Emisyon (Yayıma) Tekniği” adı verilmektedir (Hardy, 1981). Hardy (1972 ve 1981), jeolojik malzemelerdeki akustik yayılmanın kökeninin tam olarak anlaşılammış olmasına rağmen, bu olgunun birim deformasyon enerjisinin ani olarak boşalması sonucu gelişen deformasyonlar ve yenilmeler ile ilgili olabileceğini belirtmiştir.

1930’lu yılların sonlarına doğru U.S. Bureau Mines (USBM)’dan L. Obert ve W.I. Duvall, derin bir yeraltı işletmesinde gerçekleştirdikleri sonik araştırmalar sırasında, gerilmelerin etkisi altındaki kayaca sonik dalga göndermeksizin, kayaktan yayılan mikro düzeydeki titreşimleri kaydederek, Akustik Emisyon (AE) tekniğinin gelişimine öncülük etmişlerdir (Hardy, 1981) (Şekil 1). Obert ve Duvall (1942; Hardy, 1972’den ve 1945) sonraki yıllarda yaptıkları çalışmalarla bu tekniğin gelişmesinde önemli rol oynamışlardır. Bununla birlikte, Obert ve Duvall’ın çalışmalarından yaklaşık on yıl sonra gerçekleştirilmesine rağmen, malzeme bilimi alanında ilk AE araştırmalarının 1940’lı yılların sonlarına doğru Kaiser (1953; Hardy, 1981’den)’in metaller üzerinde yaptığı çalışmalarla başladığı kabul edilmektedir.

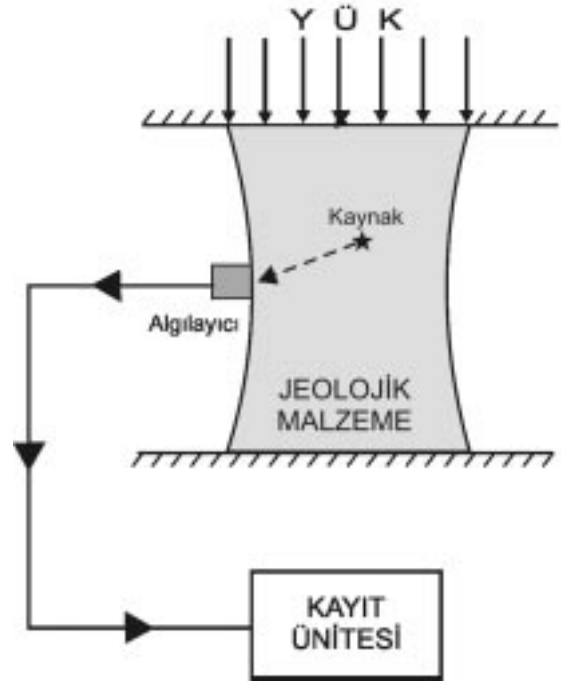
AE tekniğinin kaya mühendisliğindeki uygulamaları ABD, Kanada, Japonya ve Avrupa’da yapılan çalışmalarla yaygınlaşmış ve 1975 yılında “Jeolojik Yapı ve Jeolojik Malzemelerde AE/Mikrosismik Aktivite” konusunda gerçekleştirilmiş olan birinci konferansla birlikte AE yönteminin bu alanda kullanımı uluslararası platformda tartışılmaya başlanmıştır (Hardy, 1981). Günümüzde teknolojiye hızlı gelişmeye koşut olarak, AE ölçüm cihazlarıyla ilgili önemli gelişmeler kaydedilmiş ve yöntemin kaya mühendisliğinde; kaya ve grizu patlamaları, yeraltı ve yerüstü yapılarının duraylılığı ve arazi gerilmelerinin belirlenmesi gibi alanlarda kullanımına yönelik çalışmalar yaygınlaşmıştır (örneğin; Srinivasan vd., 1995; Styles vd., 1995; Suzuki vd., 1998; Barr vd., 1999; Seto vd., 1999; Wang vd.,

2000; Park vd., 2001). Watanabe ve Tano (1999), Watanabe vd. (1999) ve Aydan vd. (2001) tarafından Kapadokya Bölgesi’ndeki ve Batı Anadolu’daki bazı lokasyonlardan alınmış kayaçlar üzerinde arazi gerilmelerinin belirlenmesi amacıyla Türkiye’de ilk kez AE çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunların yanı sıra, herhangi bir deneysel çalışmayı içermemekle birlikte, AE ile ilgili genel kavramların tanımlandığı bir yayında (Kasapoğlu ve Gökışık, 1982) mevcuttur.

Bu yazıda; AE sinyalleri, izleme sistemlerinin özellikleri, AE parametreleri ve yöntemden yeraltı yapılarında ve şev duraysızlıklarında bir izleme ve önceden kestirim tekniği olarak yararlanılmasının yanı sıra, arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanımı gibi konular, çeşitli araştırmacıların gerçekleştirdiği çalışmalardan örnekler verilerek sunulmuştur. Ayrıca, ana hatlarıyla yöntemin avantaj ve dezavantajlarına da değinilmiştir.

AE SİNYALLERİ

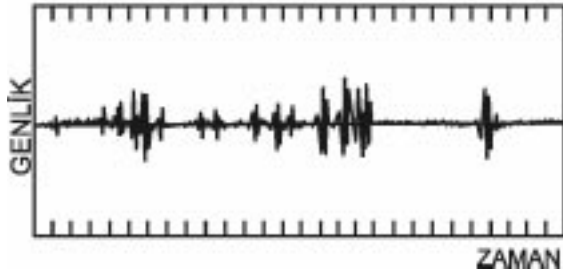
Jeolojik malzemede birikmiş olan elastik deformasyon enerjisinin ani olarak boşalması, elastik



Şekil 1. AE tekniğinin temel ilkesi (Hardy, 1981’den düzenlenmiştir).

Figure 1. Basic principle of the AE technique (arranged from Hardy, 1981).

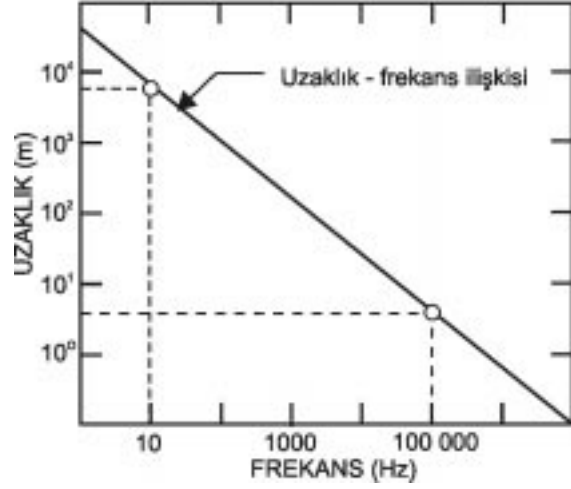
gerilme dalgası üretir ve bu dalga kaynağından malzemenin sınırına kadar yayılarak burada AE sinyali olarak izlenir. AE aktivitesinin doğada çok kristalli veya taneli olan jeolojik malzemede; mikro düzeyde yerdeğiştirmelerin sonucu, makro düzeyde ikizlenme, taneler arasındaki hareket, mineral taneleri boyunca veya tanelerin sınırındaki çatlak başlangıcı veya ilerlemesi; daha büyük ölçekte ise, geniş alana yayılmış malzemede meydana gelen kırılma, yenilme, ya da yapısal elemanların göreceli hareketi sonucu oluşabileceği belirtilmektedir (Hardy, 1972). Şekil 2'de zamana bağılı olarak ölçülen tipik bir AE sinyali kaydı görülmektedir. AE sinyalinin belirlenebilmesi; sinyalin temel frekans özelliğine, kaynak spektrumuna, azalım derecesine ve azalımın frekans bağımlılığına, algılayıcının kaynaktan olan uzaklığına, duyarlılığına, bant genişliğine ve izleme sisteminin özelliklerine bağılıdır (Hardy, 1981).



Şekil 2. Laboratuvar çalışmalarında elde edilmiş tipik bir AE sinyalinin kaydı (yatay bölmeler yaklaşık 6 ms'yi temsil eder) (Hardy, 1972).

Figure 2. A typical AE event recorded in laboratory studies (horizontal divisions represent approximately 6 ms) (Hardy, 1972).

Genel bir kural olarak, azalım (dalganın yayılımı sırasında kaynaktan olan uzaklık arttıkça etkisinin azalması ve bir noktada sönümlenmesi) ile dalganın frekansı doğru orantılıdır. Bu nedenle kaynaktan olan uzaklık arttıkça sadece düşük frekanslı AE sinyalleri izlenebilir. Dolayısıyla yüksek frekanslı sinyallerin gözlenebilmesi için kaynağa olan uzaklık belirli bir mesafeyi geçmemelidir. Hardy (1981) tarafından uzaklık-frekans ilişkisi için Şekil 3'de verilen grafik önerilmiş olup, Ohtsu (1996), bu grafiğin algılayıcı lokasyonlarının belirlenmesinde kullanılabileceğini belirtmiştir. Ayrıca bir AE sinyali, kaynak spektrumuna ve dalganın yayılımı sırasındaki etkilere bağılı olarak, farklı frekansları içerebilmektedir. Bu nedenlerle, arazide ve laboratuvarında yapılan



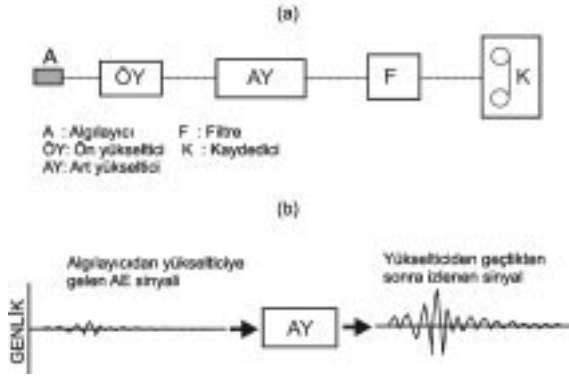
Şekil 3. AE sinyalleri için frekansın uzaklığa bağılı değişimi (Hardy, 1981).

Figure 3. Typical range versus frequency data for AE signals (Hardy, 1981).

çalışmalarda AE sinyallerinin belirlenebilmesi için kullanılan algılayıcılar farklı özelliklere sahiptir. Genel anlamda düşük frekanslı (<1 kHz) sinyal algılayıcıları arazi uygulamalarında, yüksek frekanslı (>1 kHz) sinyal algılayıcıları ise, laboratuvar çalışmalarında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, arazi çalışmalarında araştırmanın amacına bağılı olarak yüksek frekanslı algılayıcılar da kullanılabilir (Hardy ve Kimble, 1995).

AE İZLEME SİSTEMLERİ

Arazi veya laboratuvar çalışmalarında AE sinyallerinin belirlenebilmesi için "temel" ve "parametrik" olmak üzere, yaygın olarak iki tür sistem kullanılmaktadır. Temel sistemin blok diyagramı Şekil 4a'da gösterilmiştir. Algılayıcılar aracılığıyla belirlenen AE aktivitesi gerçekte sadece bir kaç milivolt genliğe sahip bir dalga şeklindedir. Oldukça küçük genlikli bu sinyallerin değerlendirilebilmeleri için, öncelikle bunların herhangi bir yapısal değişikliğe uğratılmadan yükseltilmesi gerekmektedir (Şekil 4b). Yükseltilecek AE sinyallerinin, laboratuvar ve arazi ortamında çalışılan malzeme dışından algılanan, yüklenme başlıkları arasındaki sürtünme, motor veya makine sesi gibi çevresel etkilerden (istenmeyen gürültülerden) arındırılması amacıyla filtreler kullanılmakta ve sinyaller aldıkları son şekilleriyle kayıt ortamına aktarılmaktadır. Bu tür sistemlerin önemli bir özelliği, sinyallerin yükseltilmesine

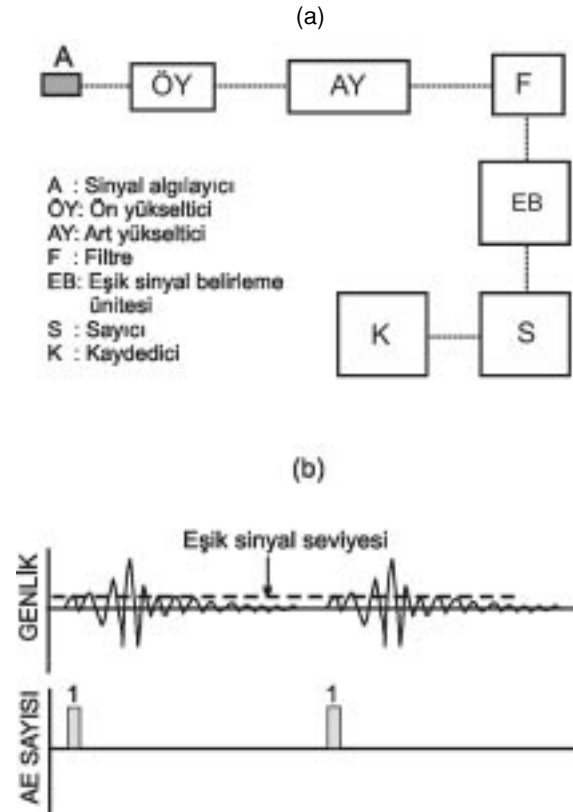


Şekil 4. (a) Temel AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi (Hardy 1981'den düzenlenmiştir) ve (b) AE sinyalinin yükseltilmesi.

Figure 4. (a) Simplified illustration of a typical basic AE system (arranged from Hardy, 1981), and (b) amplification of an AE signal.

rağmen, dalga formundaki şekillerinin korunmasıdır. Ancak bu sistemi kullanarak sürekli olarak izleme yapılabilmesi, kaydedilmesi gereken verinin çok fazla olması nedeniyle zorlaşmaktadır.

Parametrik sistemlerde ise, filtrelerden geçirilen AE sinyalleri ek işlemlere tabi tutulduktan sonra elde edilen veri kayıt ortamına aktarılmaktadır. Bu tür sistemlerde; toplam AE sayısı, AE hızı, AE enerjisi ve genişliğinin dağılımı gibi AE parametrelerinden bir veya birkaçı birlikte belirlenebilmektedir. Şekil 5a'da AE hızının belirlendiği parametrik sistem görülmekte olup, bu sistemin temel sistemden farklılığı ayrıca bir eşik belirleme ünitesini ve sayıcıyı da içermesidir. Eşik belirleme ünitesi, algılanan AE sinyallerinin dalga formunda kaydedilmesi yerine, belirli bir genlikten büyük olan kısımlarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu sistemde; filtreden geçen AE verisi ayrıca eşik belirleme ünitesinden (threshold dedector) geçirilerek, Şekil 5b'de görüldüğü gibi, seçilen eşik seviyesini aşan AE sinyalleri belirlenmekte ve her bir AE sinyali için sayıcıya bir adet sinyal gönderilmektedir. Elde edilen sayısal veri, daha sonra kayıt ünitesine aktarılmaktadır. Oldukça kullanışlı olmalarına rağmen, orijinal AE verisinin dalga formundaki şekli bu sistemlerde tamamen kaybedilmektedir. Örneğin, Şekil 5a'da verilen ve sadece AE sayısının belirlenmesine yönelik parametrik analiz yapan sistemde AE sinyallerinin geliş zamanları elde edilemediğinden, sinyale neden olan kaynağın yerinin belirlenmesi mümkün olmamaktadır. Hardy (1981), arazide herhangi bir



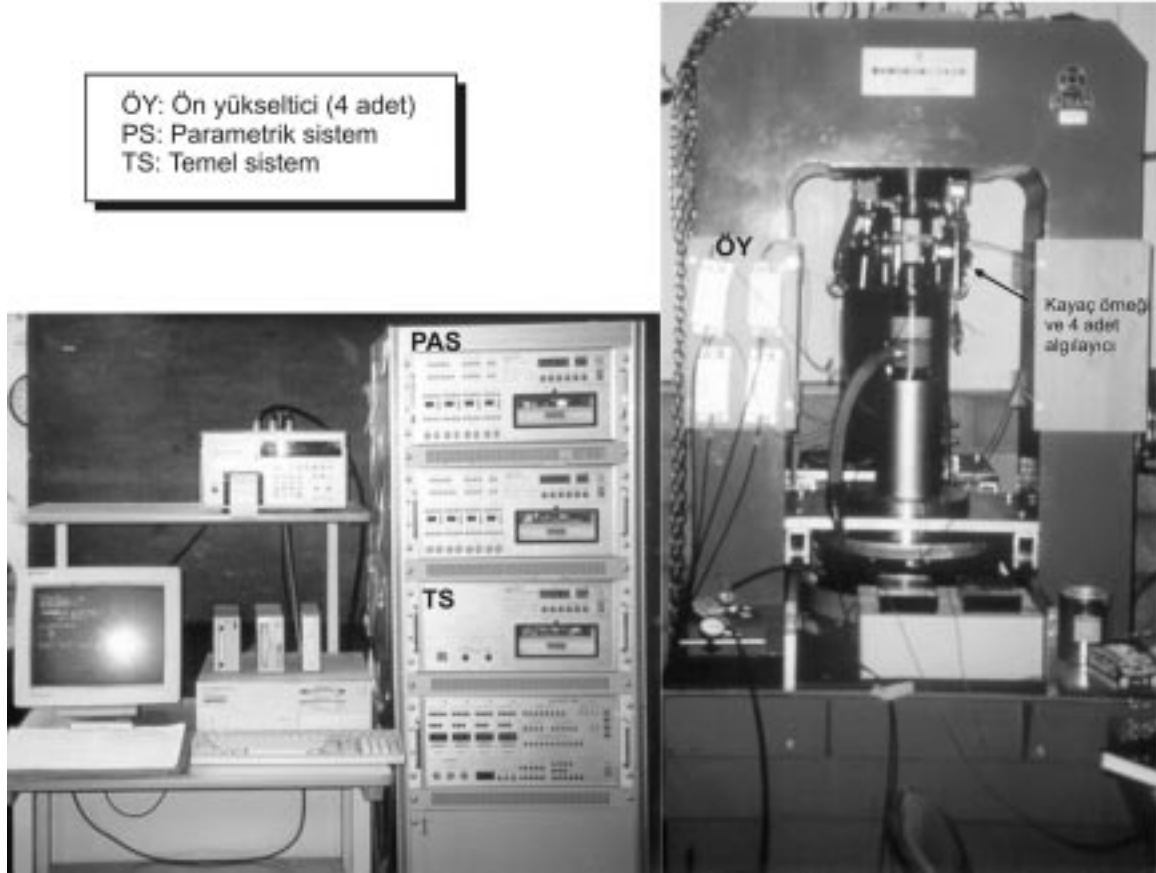
Şekil 5. (a) AE sayısının belirlendiği parametrik AE sisteminin yalınlaştırılmış çizimi ve (b) eşik seviyesi aracılığıyla AE sayısının belirlenmesi (Hardy, 1981'den düzenlenmiştir).

Figure 5. (a) Simplified illustration of the parametric AE system for the determination of AE count, and (b) determination of AE count from threshold level (arranged from Hardy, 1981).

alanda yapılacak AE çalışmaları için öncelikle basit sistemlerin kullanılmasını ve ortamdaki AE sinyallerinin özellikleri belirlendikten sonra, çalışmanın amacı da gözönünde bulundurularak, bir sonraki aşama için kullanılacak sistemin seçilmesini önermektedir. Şekil 4a ve 5a'da şematik olarak gösterilen sistemlerin her ikisinin de özelliklerine sahip gelişmiş sistemler de günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 6'da laboratuvarında kayaçların davranışlarını belirlemek için kullanılan bir hidrolik pres ile buna bağlı basit ve parametrik sistemlerin her ikisinin de özelliklerine sahip AE sistemi görülmektedir.

AE PARAMETRELERİ

Parametrik sistemlerle gerçekleştirilen izleme çalışmalarında çoğunlukla toplam AE sayısı ve

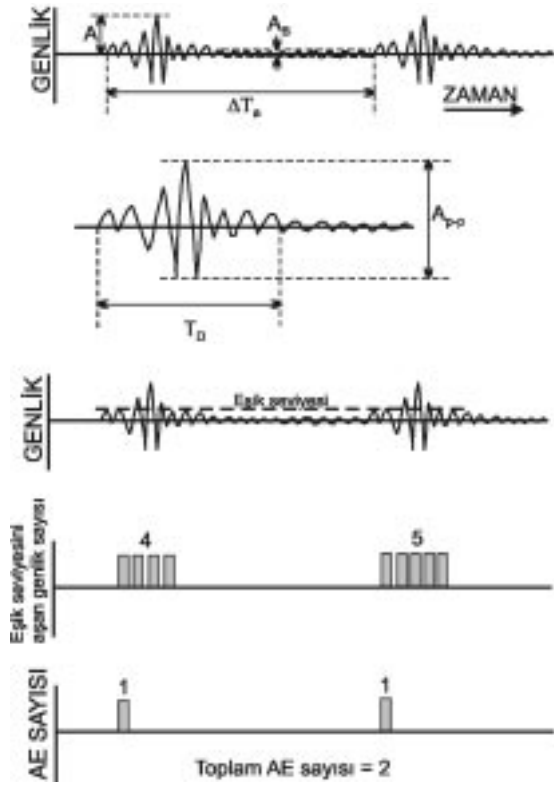


Şekil 6. Temel ve parametrik AE sistemlerin birlikte kullanılmasına bir örnek (Nihon Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarı, Japonya, 2001, Fotoğraf: E.Tuncay).
 Figure 6. An example for the combination of the basic and parametric AE systems (Nihon University, Civil Engineering Department, Rock Mechanics Laboratory, Japan, 2001, Photo: E.Tuncay).

AE hızı parametreleri elde edilmektedir. AE sayısı veya AE hızı, duraysız bölgeden kaynaklanan AE aktivitesinin zamana bağlı değişiminin belirlenmesi ve duraysızlığın gelişiminin izlenmesi açısından oldukça yararlıdır. Bununla birlikte, AE'nin büyüklüğünün göstergesi olan, dolayısıyla kaynağın yarattığı etkinin büyüklüğünü ifade eden genlik ve enerji gibi parametrelerin de değerlendirilmesi sonuçların daha doğru yorumlanabilmesi açısından önemlidir. Parametrik sistemler kullanılarak gerçekleştirilen AE tekniği uygulamalarında elde edilen bazı parametreler aşağıda tanımlanmıştır. Bu tanımlamalardan bazıları Şekil 7'de verilen yalınlaştırılmış bir AE sinyali üzerinde gösterilmiştir.

1. *Toplam Aktivite veya Toplam AE sayısı (accumulated activity or total AE count) (N)*: Belirli bir zaman aralığında gözlenen toplam AE sayısı.

2. *AE hızı (AE event rate)*: Birim zamanda gözlenen AE sayısı ($\Delta N/\Delta t$).
3. *Eşik seviyesini aşan genlik sayısı (ringdown count)*: AE olgusunun sinüzoidal çevrimlerinden eşik seviyesini aşanlarının sayısı.
4. *Genlik veya doruk Genlik (amplitude or peak amplitude) (A)*: Kaydedilen her bir AE'nin en büyük genlik değeri.
5. *Doruklar Arasındaki Genlik Değeri (peak to peak amplitude) (A_p-p)*: AE'nin pozitif ve negatif en büyük değerleri arasında ölçülen genlik.
6. *Enerji (E)*: Genliğin veya Doruk genliğin karesi (A^2).
7. *Toplam Enerji (accumulated energy)*: Belirli bir zaman aralığında gözlenen tüm AE'lerden yayılan enerjinin toplamı ($\sum E_i$).
8. *Enerji Hızı (energy rate) (ER)*: Birim zamanda gözlenen tüm AE'lerden yayılan enerjinin toplamı ($(\sum E_i/\Delta t)$).



Şekil 7. AE verisinin tipik bir kesiti ve AE parametrelerinin belirlenmesi (Hardy, 1981 ve Ohtsu, 1996'dan düzenlenmiştir).

Figure 7. Typical section of AE data and determination of the AE parameters (arranged from Hardy, 1981, and Ohtsu, 1996).

9. *AE süresi (TD)*: Bir AE'nin oluşum ve bitimi arasında geçen toplam zaman.

10. *AE'ler arası süre (ΔTa)*: İki AE oluşumu arasında geçen süre.

Jaroszewska ve Reymond (1995), dolomitik kireçtaşı ve kumtaşlarından hazırladıkları karotlar üzerinde laboratuvarında yaptıkları AE çalışmalarında, doruk genlik, enerji, toplam enerji ve toplam AE sayısı parametrelerini birbirleriyle karşılaştırarak bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesinin, yenilme mekanizması hakkında daha doğru sonuçlar elde edilmesi açısından yararlı olacağını vurgulamışlardır.

AE İZLEME TEKNİKLERİ

Arazide gerçekleştirilen AE izleme çalışmalarının, genel izleme ve kaynak yerinin belirlenmesi olmak üzere, iki amacı vardır (Hardy, 1981). Genel izleme çalışmalarında amaç, çalışma

alanında herhangi bir yapay veya doğal etkiye maruz kalmış jeolojik malzemenin ürettiği AE aktivitesinin yaratılan etkiye bağlı olarak değişimini araştırmaktır. Şev duraysızlıklarının izlenmesi veya gaz depolama alanlarında depolama basıncının çevre kayada yarattığı etkinin AE tekniği ile araştırılması, bu tür çalışmalara verilebilecek tipik örneklerdir. Bu tür araştırmalarda sınırlı sayıda algılayıcı ile çalışılmakta ve elde edilen sonuçlar ön değerlendirme amacıyla kullanılmaktadır. Kaynak yerinin araştırılmasında ise, daha fazla algılayıcıya gereksinim duyulmakta ve bunların dizilimleri önemli bir rol oynamaktadır.

Kaynak yerinin bir düzlemdeki izdüşümünün belirlenmesi için aynı düzlem üzerine yerleştirilmiş en az 3 algılayıcı, kaynağın merkezini belirlemek için ise aynı düzlem üzerinde bulunmayan 4 veya daha fazla sayıda algılayıcı gerekmektedir (Şekil 8). "Geliş zamanındaki farklılık yöntemi" olarak bilinen ve aşağıdaki eşitlikte ifade edilen analitik bir çözümle kaynak lokasyonu belirlenebilmektedir.

$$(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2 = V_i^2 (t_i - T_0)^2 \quad (1)$$

Burada;

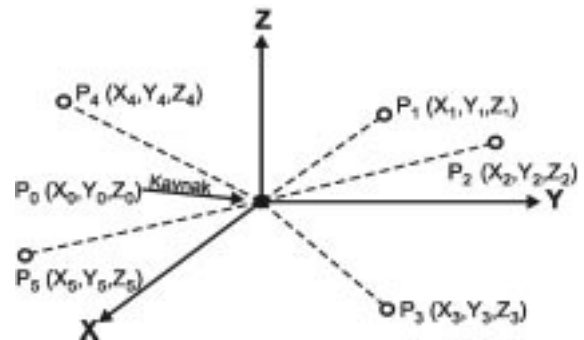
T_0 : Kaynaktan yayılan AE'nin gerçek başlangıç zamanı

t_i : AE sinyalinin algılayıcıya varış zamanı

V_i : AE sinyalinin yayılma hızı (m/s)

X_0, Y_0, Z_0 : Kaynağın koordinatları

X_i, Y_i, Z_i : Algılayıcıların koordinatları



Şekil 8. AE algılayıcılarının (P_1 - P_5) diziliminin ve kaynak yerinin (P_0) şematik gösterimi (Hardy, 1978).

Figure 8. Schematic illustration of the geometry of the AE transducer array (transducers are located at points P_1 to P_5 with the microseismic source at point P_0) (Hardy, 1978).

X_0 , Y_0 , Z_0 ve T_0 bilinmeyen parametreler olduğundan, kaynağın merkezinin belirlenmesinde 4 algılayıcı, dolayısıyla 4 eşitlik yeterli olmaktadır. Bununla birlikte Hardy (1978), olası hataların en aza indirilmesi amacıyla, kaynak yerinin bir düzlemdeki izdüşümünün belirlenmesi için en az 4 algılayıcının, kaynağın merkezinin saptanması için ise en az 5 algılayıcının kullanılmasını önermektedir. AE sinyalinin kaynağının belirlenmesi, kuramsal açıdan kolay gibi görünse de, sinyalin ortamdaki yayılma hızının hesaplanmasında veya algılayıcıya geliş zamanlarının saptanmasında ortaya çıkan hatalar, merkezin belirlenmesinde sorunlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, kaynağın yerinin belirlenmesinde algılayıcı sayısının artırılması daha güvenilir sonuçların elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Böylece, en küçük kareler yöntemiyle hatalar en aza indirilerek, elde edilen eşitlik takımı için en iyi, ya da ortalama çözümün bulunması mümkün olabilmektedir (Hardy, 1978). Descour (1995) ise, dalga yayılma hızının kaynaktan olan uzaklığa bağlı olarak farklılık gösterdiğini ve tüm algılayıcılardan elde edilen sinyallerin geliş zamanının belirlenmesinde tek bir yayılma hızının kullanılmasının hatalara neden olacağını belirtmektedir. Adı geçen araştırmacı gerçekleştirdiği model deneyler sonucunda, her bir algılayıcıdan elde edilen dalga formlarının hakim periyoduna bağlı olarak dalganın yayılma hızının belirlenmesini ve her bir algılayıcıya gelen AE sinyalinin geliş zamanının hesaplanmasında bu hız değerlerinin kullanılmasını önermişlerdir.

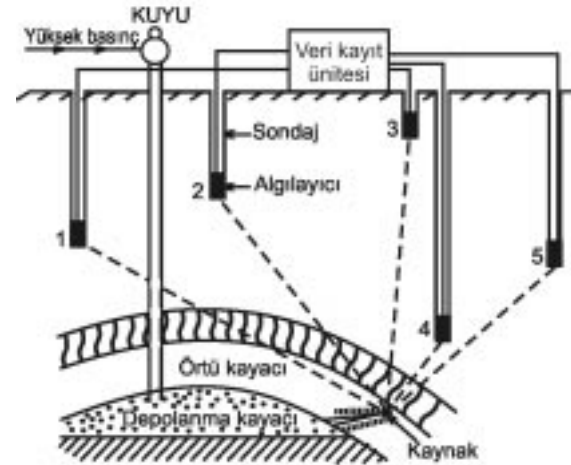
Kaynak lokasyonunun yerinin uygulamalarıyla belirlenmesi ise, üzerinde çalışılan jeolojik malzemenin geometrisinin karot veya küp gibi düzgün şekilli olmasından ve tek bir malzemeden oluşmasından dolayı daha basit bir uygulama gibi görünmektedir. Ancak laboratuvar uygulamalarında araştırılan malzemenin boyutları küçük olduğundan ve dolayısıyla kaynaktan yayılan AE sinyalleri çok daha az mesafe katederek algılayıcılara ulaştıklarından, algılayıcı yerlerinin ve geliş zamanı farklılıklarının çok duyarlı olarak belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca tek bir kayaç, beton vb. gibi malzemeler üzerinde çalışılıyor olmasına rağmen, malzemedeki kristallerin veya tanelerin, ya da mikro çatlakların düzensiz dağılması kaynağın yerinin belirlenmesini oldukça güçleştirmektedir. Bu nedenle, algılayıcı sayısının fazla olması ve algılayıcıların yerlerinin iyi belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

AE TEKNİĞİNİN KAYA MÜHENDİSLİĞİNDEKİ UYGULAMALARI

AE tekniği, özellikle kaya mühendisliği uygulamalarıyla ilgili olan yeraltında petrol, doğalgaz vb. depolama çalışmaları, yeraltı madenciliği, tünel inşası, şev duraylılığı ve arazi (in-situ) gerilmelerinin belirlenmesi gibi alanlarda kullanılmaktadır. AE tekniğinin bazı arazi ve laboratuvar uygulamaları ile kaya mühendisliğindeki kullanımı çeşitli araştırmalar esas alınarak aşağıda ana hatlarıyla tartışılmıştır.

Yeraltı Depolama Çalışmaları, Yeraltı Madenciliği ve Tünelcilikteki Uygulamalar

Bir çok ülkede yeraltında doğal gaz, ham petrol, katı atık depolanması gibi çalışmalar yıllardır yapılmaktadır. AE tekniği, depolamanın yapıldığı kaya kütlelerinin uzun süreli duraylılığının izlenmesi amacıyla kullanılan en uygun tekniklerden biridir. Hardy (1972, 1976 ve 1978), yeraltında doğal gazın depolandığı kaya kütlesi ve çevresindeki kayaçların duraylılığını AE tekniğiyle araştırmıştır. Araştırmacı, anlamlı veri elde edilebilmesi için, ilk çalışmasında önerdiği 4 algılayıcı sayısının ve bunların konumlarının yetersiz olduğunu ve Şekil 9'da gösterildiği gibi AE tekniğinin en az 5 algılayıcı kullanılarak uygulanması

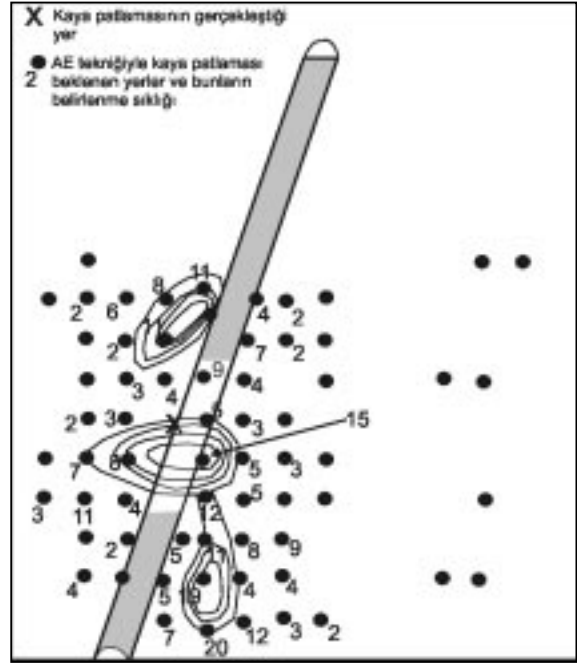


Şekil 9. Bir yeraltı gaz depolama sahasıyla ilgili olarak AE aktivitesinin yerinin belirlenmesi ve algılayıcıların konumları (1-5: algılayıcılar) (Hardy, 1978).

Figure 9. Transducer arrangement for the location of AE activity associated with an underground gas storage reservoir (1 to 5 : transducers) (Hardy, 1978).

gerektiğini vurgulamıştır. Bunun yanı sıra araştırmacı, elde edilen verilerin uygun bir teknikle değerlendirilerek tüm rezervuarın genel anlamda duraylılık koşulu ile depolama veya çevre kayacındaki gelişmesi olası duraysızlıklar hakkında, pompalama basıncına bağlı olarak, bilgi edinilebileceğini ve duraysızlığın gelişebileceği alanların belirlenmesinin mümkün olduğunu belirtmiştir. Ancak söz konusu kaynakta (Hardy, 1978) bu uygulamayla ilgili sonuçların ayrı bir rapor halinde hazırlanacağı ifade edilmekte olup, bu rapora yazarlar tarafından ulaşılamamıştır.

Sert kaya ortamlarında gerçekleştirilen derin yeraltı madencilik uygulamalarında kaya patlamaları, kömür madenlerinde de grizu patlamaları ciddi sorunlar yaratmaktadır. Ayrıca, süreksizlik içeren kaya kütlesi ortamlarında açılan yeraltı galerileri veya otoyol tünellerinde kaya düşmeleri, aşırı sökülme vb. gibi sorunlar yaşanabilmekte ve bunlar istenmeyen sonuçlar doğurabilmektedir. Bu nedenle bu tür sorunların önceden tahmin edilebilmesi, olası hasarların ve can kayıplarının önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Obert ve Duvall'ın 1930'lu ve 1940'lı yıllarda geliştirdikleri AE tekniğinden yararlanılarak, kaya patlamalarının önceden kestirilebilmesine yönelik olarak yapılan çalışmalar, bu alandaki uygulamaların ilk örnekleridir (Hardy, 1972). Kaya patlamalarının önceden kestirilebilmesi, ancak duraysızlıkların gerçekleştiği alanların merkezlerinin saptanmasına yönelik AE çalışmalarıyla mümkün olabilmektedir. Blake ve Leighton (1970) ve Blake (1971), derin yeraltı maden işletmelerinde yaptıkları çalışmalarda, kaya patlamalarının çoğunun daha önce AE çalışmaları sonucu patlama beklenen lokasyonlarda gerçekleştiğini belirtmektedirler. Blake ve Leighton (1970)'un Galena altın madeninde 25 Haziran ve 16 Ağustos 1968 tarihleri arasında AE'lerin algılandıkları yerler ile bu yerlerin belirlenme sıklıklarına bağlı olarak oluşturdukları konturlar ve 19 Kasım 1968 tarihinde meydana gelmiş olan kaya patlamasının yeri Şekil 10'da görülmektedir. Bu araştırmacıların yaptıkları uygulama, AE yönteminden yararlanılarak kaya patlamasının yerinin yaklaşık olarak belirlenebilmesi ve olası kaya patlamasının beklenildiği bölgelerde önceden alınacak önlemler açısından oldukça önemlidir. Srinivasan vd. (1995), bir yeraltı altın işletmesinde kaya patlamalarının önceden kestirimi için AE çalışması yaparak, Şekil 11'de görüldüğü gibi, zamana

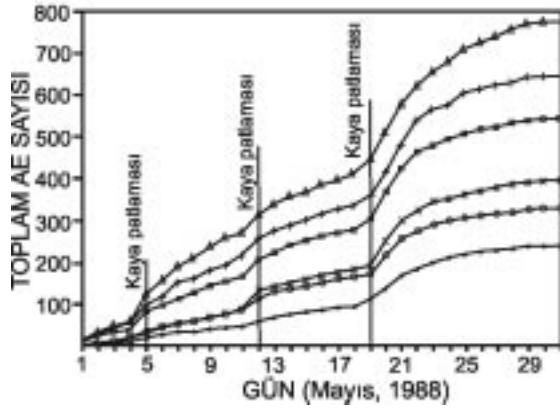


Şekil 10. Galena yeraltı işletmesinde (ABD) AE tekniği ile belirlenmiş kaya patlaması beklenen lokasyonlar ve gerçekleşen kaya patlamasının yeri (Blake ve Leighton, 1970).

Figure 10. Probable rock burst locations estimated from AE technique and the location of a rockburst occurred after AE measurements at Galena mine (USA) (Blake and Leighton, 1970).

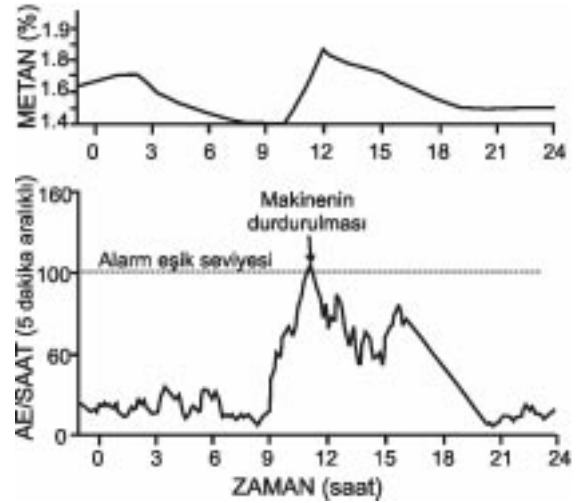
bağlı toplam AE sayısı ve meydana gelen kaya patlamaları arasında bir ilişkinin varlığını göstermişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda, kaya patlamasının gerçekleşebileceği bölgelerin önceden belirlenebilmesi ve önlemlerin alınabilmesi açısından AE tekniğinin oldukça kullanışlı olduğu ifade edilmektedir.

Yeraltı kömür madenlerinde meydana gelen grizu patlamalarının önceden kestirimi amacıyla AE tekniğinin uygulanması, bu tehlikenin etkisinin azaltılabileceğini veya tamamen yok edilebileceğini göstermiştir (Hardy, 1981). Sugawara vd. (1987), AE tekniğinin bazı sınırlamalarıyla birlikte, grizu patlamasının saptanmasında kullanılabileceğini belirtmişler, ayrıca Will vd. (1995) ve Styles vd. (1995) metan gazı patlamasının AE çalışmalarıyla denetlenebileceğini göstermişlerdir. Styles vd. (1995) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, metan gazı oranındaki artışla AE sayısındaki artışın uyum içinde olduğu ve AE sayısının belirli bir değeri aşması



Şekil 11. Kolar altın madenindeki (Hindistan) bir kuyunun 98 ve 103 numaralı seviyeleri arasında yerleştirilen algılayıcılardan elde edilen zamana bağlı toplam AE sayısı izleme sonuçları ve toplam AE sayısının gerçekleşen kaya patlamaları ile ilişkisi (Srinivasan vd., 1995).

Figure 11. Cumulative AE count plots taken from the transducers located at 98 to 103 levels of a shaft at Kolar gold mine (India) and relationship between the AE counts and rock bursts (Srinivasan et al., 1995).



Şekil 12. Metan gazı artışıyla AE sayısı arasındaki ilişki ve AE sayısının artışına bağlı olarak eşik seviyesinin belirlenmesi (Styles vd., 1995).

Figure 12. Relationship between the increase in methane emission (coal outburst) and AE count, and determination of alarm threshold level depending on the increase in AE count (Styles et al., 1995).

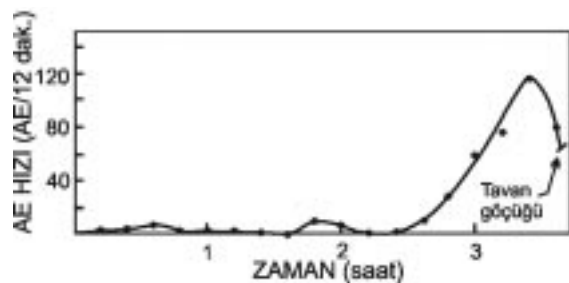
durumunda kazı makinelerinin kazıyı sona erdirmeleri için bir erken uyarı sisteminin kurulabileceği belirlenmiştir (Şekil 12). AE tekniği kullanılarak ayrıca, tünellerde tavan göçüğünün önceden kestirimi (Hooker vd., 1974; Şekil 13) ve kaya saplamalarının davranışlarının izlenmesi (Ünal vd., 1982) gibi çalışmalar da yapılmıştır. Şekil 13'ten görüleceği gibi, göçükten yaklaşık bir saat önce AE hızında bir artış başlamakta ve bu artış göçüğün meydana gelmesinden 15 dakika önce doruk değerine ulaşmaktadır.

Yukarıda değinilen uygulamalardan, yeraltı kazılarında karşılaşılan mühendislik sorunlarının izlenerek erken uyarı sistemlerinin kurulmasında AE tekniğinden oldukça kullanışlı bir araç olarak yararlanılabileceği görülmektedir. Ancak, çalışmanın amacına bağlı olarak, uygun algılayıcıların seçilmesi, algılayıcıların yerleştirilecekleri yerlerin belirlenmesi ve sistem seçimi, AE tekniğinin başarıyla uygulanabilmesi yönünden oldukça önemli faktörlerdir.

Şevlerdeki Uygulamalar

Özellikle açık işletmelerde meydana gelen şev duraysızlıkları mühendislerin sıkça karşılaştığı

bir sorun olup, izleme çalışmaları bu sorunun önceden kestirilebilmesi ve gerekli önlemlerin alınabilmesi açısından vazgeçilmez bir araç olmaktadır. Şev duraylılığıyla ilgili hareket izleme çalışmaları genellikle elektronik mesafe ölçerler, inklinometre ve ekstansometre gibi çeşitli cihazlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak bu yöntemler, yenilmenin (kaymanın) belirgin bir şekilde başladığı andan itibaren kullanışlı olmaktadır.

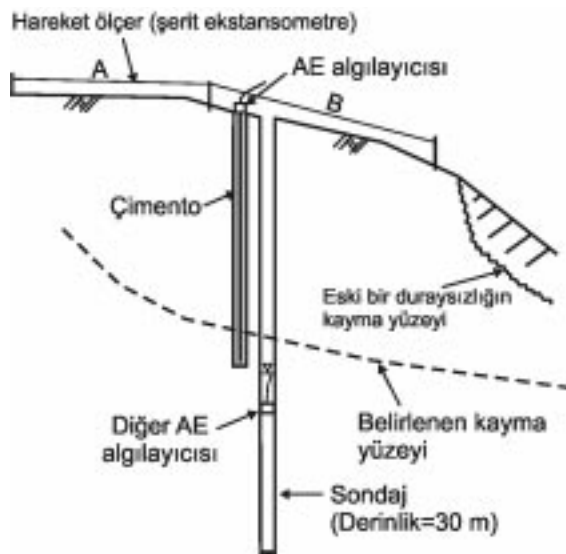


Şekil 13. Tavan göçüğünün meydana geldiği bir tünelde göçük öncesine ait AE hızı – zaman grafiği (Hooker vd., 1974).

Figure 13. Roof noise rate (AE event rate) versus time graph before roof failure at a tunnel (Hooker et al., 1974).

Koerner vd. (1977 ve 1978), laboratuvar modelleri üzerinde ve arazide gerçekleştirdikleri AE deneyleriyle, toprak zeminlerde de AE sinyallerinin belirlenebileceğini ve bu sinyallerin duraysızlıkların göstergesi olarak değerlendirilebileceğini belirtmişlerdir. McCauley (1977), kaya ve toprak zeminler içinde açılmış şevlerde, kesin bir değerlendirme yapılamamakla birlikte, olası duraysızlıkların tahmin edilmesinde AE tekniğinin diğer izleme teknikleriyle birlikte kullanılabilirliğini öne sürmüştür. Stateham ve Merrill (1979; Hardy, 1981'den) ise, açık işletmelerde AE yönteminden yararlanılarak yapılan izleme çalışmalarının, yeraltındaki uygulamalara oranla daha zor olduğunu belirtmektedir. Vladut ve Lepper (1989), Styles vd. (1995)'nin grizu patlamasının önceden belirlenmesi ve önlenmesi için önerdikleri erken uyarı sistemine benzer bir sistemin Kanada'da bir açık işletmedeki şev duraysızlıklarının izlenmesinde kullanılmasını önermişlerdir.

Chichibu vd. (1989), çamurtaşı içinde açılmış bir şevde (Şekil 14) gerçekleştirdikleri hareket izleme ve AE çalışmaları sırasında; AE sayısının duraysızlıktan iki ay önce artmaya başladığını, yüzeyde ve derinde yapılan ölçümlerde belirgin bir hareket gözlenmemesine rağmen AE sayısındaki bu artışın (Şekil 15) nedeninin gerilme birikmesinden ve mikro çatlakların gelişmesin-



Şekil 14. Doğal bir yamaçta hareket izleme ve AE çalışması (Chichibu vd., 1989).

Figure 14. Movement monitoring and AE study at a natural slope (Chichibu et al., 1989).

den kaynaklanmış olabileceğini belirtmektedirler. Aynı çalışmada, şev duraysızlıklarının izlenmesinde ve önceden kestiriminde AE tekniğinin diğer izleme tekniklerine göre daha kullanışlı veriler sağlayacağı da öne sürülmektedir. Araştırmacılar, inceledikleri duraysızlığa neden olan tahmini yenilme yüzeyinin konumunu ise, inklinometreyle aldıkları verilerden belirlemişlerdir.

Yukarıda değinilen çalışmalar; zamana bağlı AE sayısı veya toplam AE sayısı grafiklerinin yorumlanmasıyla şev duraysızlığının önceden kestirilebilmesine yönelik çalışmalardır. Ancak bunlar, diğer önemli bir husus olan kaynak yerinin, dolayısıyla yenilme yüzeyinin konumunun belirlenmesine yönelik bir veri sağlamamaktadır. Duraysız bir şevde yenilme (kayma) yüzeyinin belirlenmesi, özellikle duraysızlığın geriye dönük analizinin yapılması açısından oldukça önemlidir. Ancak hareket sırasında oldukça fazla sayıda kaynaktan AE sinyali algılanacağından, AE tekniğiyle yenilme yüzeyinin konumunun belirlenmesi, imkansız olmasa da, oldukça zordur. Yenilme yüzeyinin belirlenmesine yönelik bir çalışmada Suzuki vd. (1998), ileri derecede bozunmuş bir çamurtaşı içinde gelişmiş bir heyelanda kayma yüzeyinden daha derine ulaşacak şekilde yerleştirdikleri iki adet çubuğun her iki ucuna yerleştirilen AE algılayıcılarından (Şekil 16) elde ettikleri verileri değerlendirmişlerdir. Araştırmacılar, Şekil 16'da görülen AE çubuklarından yararlanarak kayma yüzeyinin derinliğinin (x) belirlenmesi için aşağıdaki eşitliği kullanılabileceğini önermişlerdir.

$$x = (L - V_p \cdot \Delta t) / 2 \quad (2)$$

Burada;

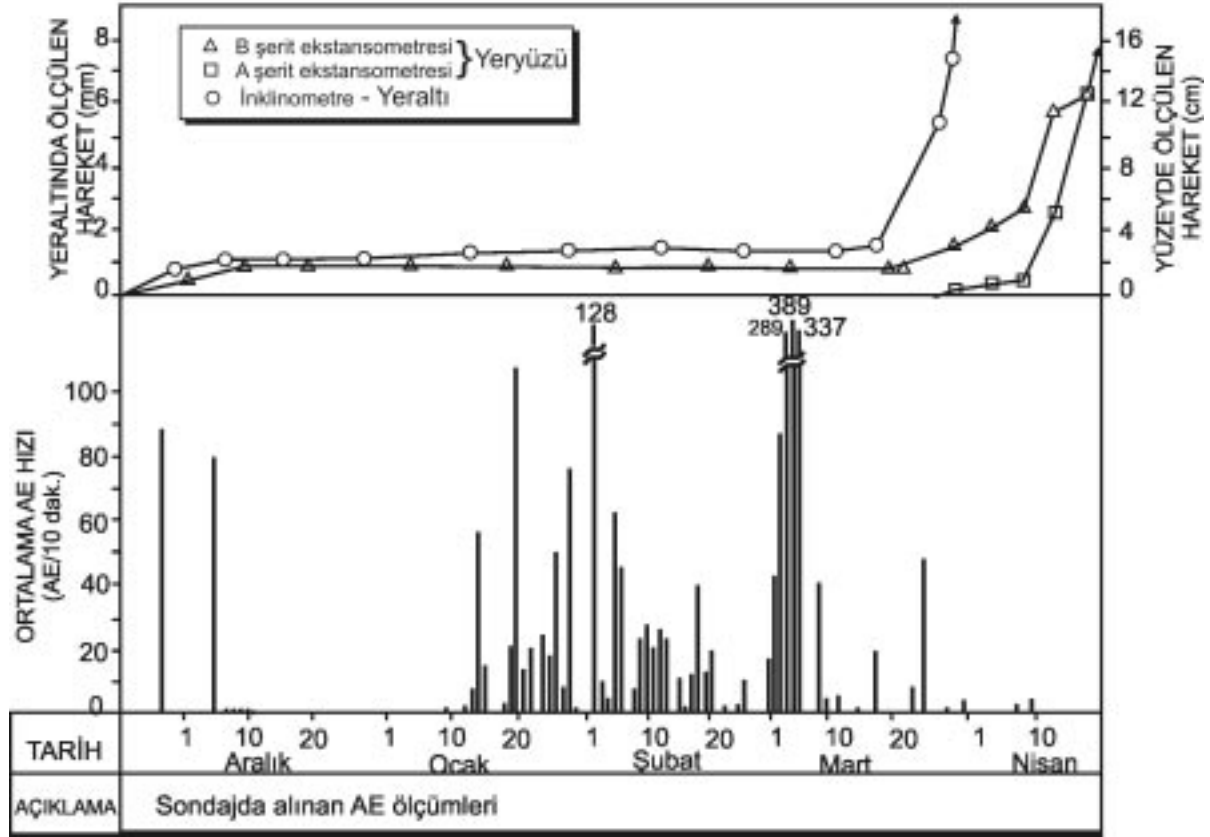
L: AE çubuğunun uzunluğu (m)

V_p : AE dalgalarının yayılma hızı (m/s)

Δt : AE dalgasının çubuğun her iki ucundaki algılayıcılara varış zamanı arasındaki fark (μs)

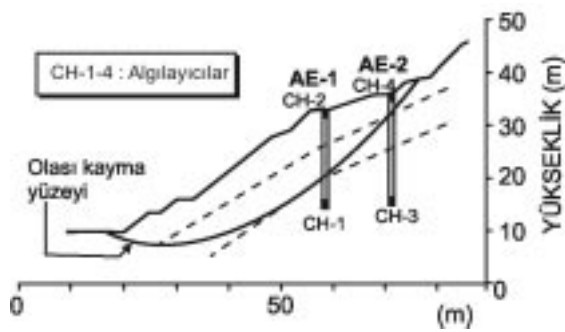
Ancak Suzuki vd. (1998), kaydedilen AE sinyallerinin belirgin olmamasından dolayı kayma yüzeyine ilişkin bilgi toplayamamışlardır. Araştırmacılar, böyle bir araştırma için daha fazla veriye ihtiyaç duyulduğunu, ancak yeraltısuyunun yükselmesi ve hareketin artması ile AE hızındaki artışın uyumlu olduğunu da belirtmektedirler.

Şev duraysızlıklarında kayma yüzeylerinin belirlenmesi amacıyla AE tekniğinin başarılı şekilde



Şekil 15. Doğal bir yamaçta yüzeyde ve derinde yapılan hareket izleme ölçümleriyle AE çalışmasının sonuçlarının karşılaştırılması (Chichibu vd., 1989).

Figure 15. Comparison of the results from surface and underground movement monitoring studies and AE study at a natural slope (Chichibu et al., 1989).



Şekil 16. Bir heyelan sahasında AE çubuklarının ve algılayıcıların yerlerini ve konumlarını gösteren kesit (Suzuki vd., 1998).

Figure 16. Cross-section showing the locations and positions of AE rods and transducers at a landslide area (Suzuki et al., 1998).

kullanımına yönelik bir çalışmaya, yazarların ulaşabildiği kaynaklar arasında rastlanmamıştır. Yazarlar, Suzuki vd. (1998) tarafından önerildiği

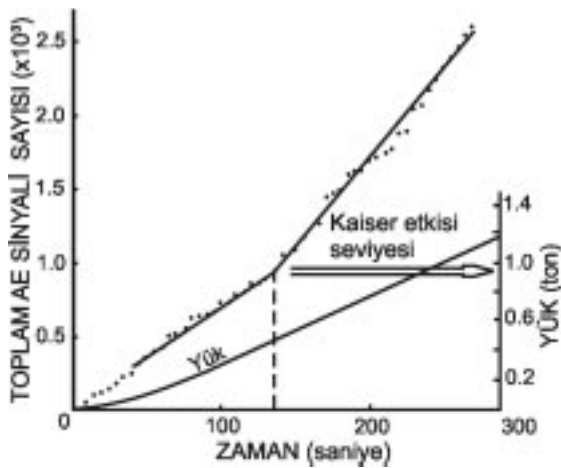
gibi, AE çubuklarından daha fazla veri toplanarak kayma yüzeyinin konumu tahmin edilse bile, elde edilen verinin benzer şekilde yerleştirilen ve daha kesin sonuçların alınabildiği inklinometrelere oranla, daha az güvenilir olduğunu düşünmektedirler.

Arazi Gerilmelerinin Belirlenmesi ve Depremlerin Yorumlanmasıyla İlgili Uygulamalar

Laboratuvarda gerilme uygulanan kayaç karot örneklerinden algılanan AE sinyallerinin kayacın doğal ortamında maruz kaldığı birincil gerilme değerinin belirlenmesinde kullanılabileceği, ilk kez Kanagawa (1976; Hayashi vd., 1979'dan) tarafından öne sürülmüştür. Bu araştırmacı, Kaiser (1953; Hayashi vd., 1979'dan) tarafından metaller için önerilen ve "Kaiser Etkisi (KE)" olarak bilinen gerilme seviyesinin kayalar için de kullanılabileceğini göstermiştir.

Daha önce belirli bir gerilmenin etkisi altında kalmış metal, kayaç vb. malzeme ikinci kez yüklendiğinde ilk gerilme seviyesine kadar az miktarda AE sinyali üretirken, bu gerilme seviyesinin aşılması durumunda AE sayısında hızlı bir artış gözlenmektedir. İkinci yüklemde elde edilen "AE sayısı-zaman" grafiklerinde ani bir artışın gözleendiği bu seviye Kaiser etkisi olarak bilinmektedir. Benzer şekilde, laboratuvarında yüklenen kayaç karot örneklerinin, doğal ortamda etkisinde kaldıkları gerilme değerine ulaşılan değin az sayıda AE sinyali gönderdiği, bu gerilme değerinin aşılması ile AE sayısının da aniden artmaya başladığı Kanagawa vd. (1976; Hayashi vd., 1979'dan) tarafından belirtilmiştir (Şekil 17). Hayashi vd. (1979), AE tekniğinden elde ettikleri gerilme değerlerini, gerilim boşaltma (overcoring) yönteminden elde ettikleriyle karşılaştırmışlar ve AE tekniğinden belirlenen değerlerin daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle bu araştırmacılar, AE'den elde ettikleri gerilme değerlerinin kayacın tarihsel süreçte etkisi altında kaldığı en büyük gerilme değerleri olabileceğine işaret etmektedirler.

Sonraki yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda (örneğin, Holcomb ve Martin, 1985; Hughson ve Crawford, 1987; Hardy vd., 1989; Jupe vd., 1992; Seto vd., 1992; Ishiguro vd., 1999), bu tekniğin gerilmenin belirlenmesi amacıyla kullanılabilirliği ve Kaiser Etkisi seviyesinin kayacın

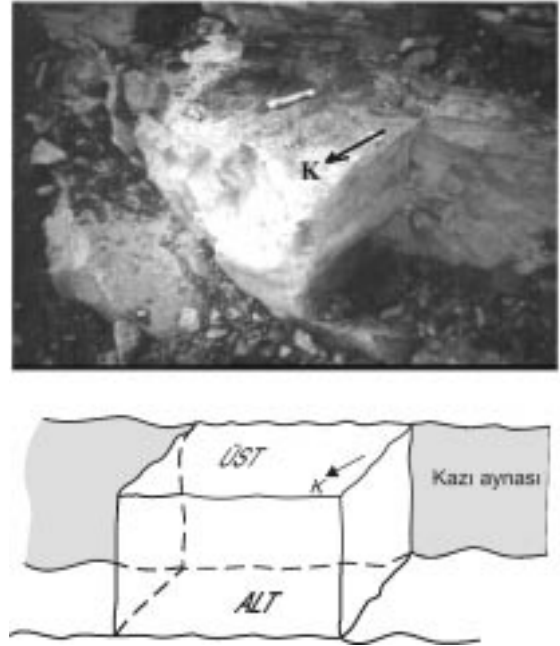


Şekil 17. Kaiser Etkisi seviyesinin "toplam AE sayısı - zaman" grafiğinden belirlenmesi (Hayashi vd., 1979).

Figure 17. Determination of the Kaiser Effect level from the "total AE count - time" plot (Hayashi et al., 1979).

günümüzde etkisinde kaldığı gerilme değerini mi, yoksa tarihsel süreçte etkisinde kaldığı en büyük gerilme değerini mi temsil ettiği tartışma konusu olmuştur. Farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda AE ve diğer gerilme ölçüm yöntemleriyle belirlenmiş gerilme değerleri Çizelge 1'de karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'den görüleceği gibi, Jupe vd. (1992) tarafından gerçekleştirilen çalışmada AE tekniğinden ve gerilim boşaltma yönteminden elde edilen değerler oldukça farklı iken, diğer çalışmalarda oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Benzer sonuçların elde edilmesi ve AE yönteminin oldukça nisbeten düşük maliyetli ve daha pratik olması bu alandaki araştırmaların artmasına neden olmuştur.

AE tekniği aracılığıyla arazi gerilmelerinin belirlenmesi için öncelikle yeraltı ocakları veya açık işletmelerden, ya da belirli derinliklere ulaşmış taş ocaklarından elde edilen yönlü kayaç bloklarından (Şekil 18) altı farklı yönde karot alınması gerekmektedir (Şekil 19). Elde edilen karotlar laboratuvarında sabit yüklem hızında tek eksenli gerilmeye maruz bırakılmakta ve parametrik AE sistemiyle AE sinyalleri algılanarak, "zaman - toplam AE sayısı ve gerilme" grafiğinden KE



Şekil 18. AE uygulaması için yeraltından yönlü blok örnek alınması.

Figure 18. Oriented block sampling from underground excavation for the application of AE.

Çizelge 1. Çeşitli araştırmacıların AE tekniğinden ve arazi deneylerinden elde ettikleri gerilme değerleri
Table 1. Stress values obtained from AE method and in-situ tests by various investigators

Araştırmacı	Ülke	Arazi gerilmesi değerleri (MPa)		Hidrolik çatlatma yöntemi
		AE yöntemi	Gerilim boşaltma yöntemi	
Hayashi vd. (1979)	Japonya	$\sigma_{hx}=5.9-9.81$ $\sigma_v=9.81$ $\sigma_{hy}=5.9-13.7$	$\sigma_{hy}=11.8$ $\sigma_{hx}=5.9$ $\sigma_v=3.9-7.8$	–
Jupe vd. (1992)	ABD	$\sigma_1=27.1$ $\sigma_2=11.6$ $\sigma_3=1.6$	$\sigma_1=58.8$ $\sigma_2=14.5$ $\sigma_3=10.8$	–
Seto vd. (1992)	Japonya	$\sigma_v=9.2$ $\sigma_{hx}=10.2$	–	$\sigma_v=8.9$ $\sigma_{hx}=10.2$
Momayez ve Hassani (1992)	Kanada	$\sigma_1=55\pm 5$ $\sigma_3=14\pm 1$	$\sigma_1=61\pm 6$ $\sigma_3=11\pm 5$	–
Ishiguro vd. (1999)	Japonya	$\sigma_v=11.2$ $(\sigma_h)_{max}=22.0$ $(\sigma_h)_{min}=10.5$	$\sigma_v=11.3$ $(\sigma_h)_{max}=24.6$ $(\sigma_h)_{min}=11.2$	$\sigma_v=9.4$ $(\sigma_h)_{max}=25.4$ $(\sigma_h)_{min}=13.4$
Seto vd. (1999)	Japonya	$\sigma_{hx}=10.2$	–	$\sigma_{hx}=10.5$
Wang vd. (2000)	Çin	$\sigma_1=27.5$ $\sigma_2=18.4$ $\sigma_3=13.8$	$\sigma_1=28.4$ $\sigma_2=19.7$ $\sigma_3=12.0$	–

σ_v : düşey gerilme, σ_{hx} , σ_{hy} : X ve Y yönündeki yatay gerilmeler, $(\sigma_h)_{max}$, $(\sigma_h)_{min}$: en büyük ve en küçük yatay gerilmeler, σ_1 , σ_2 , σ_3 : asal gerilmeler

seviyesine karşılık gelen gerilme değeri saptanmaktadır (Şekil 20). Belirlenen bu gerilme değerleri karotların alındıkları yöndeki arazi gerilmesini temsil etmekte olup, bu değerlerden yararlanılarak bloğun alındığı yer için asal gerilmeler ile ve en büyük ve en küçük yatay gerilmelerin belirlenmesi mümkün olabilmektedir.

Çizelge 2’de Bigadiç ilçesindeki Simav Bor Açık İşletmesi’nden alınmış bir kaya örneği üzerinde Tuncay vd. (2002) tarafından yapılmış AE deneyinin sonucu, örnek olarak verilmiştir. 70 m derinlikten alınan kaya bloğundan hazırlanmış

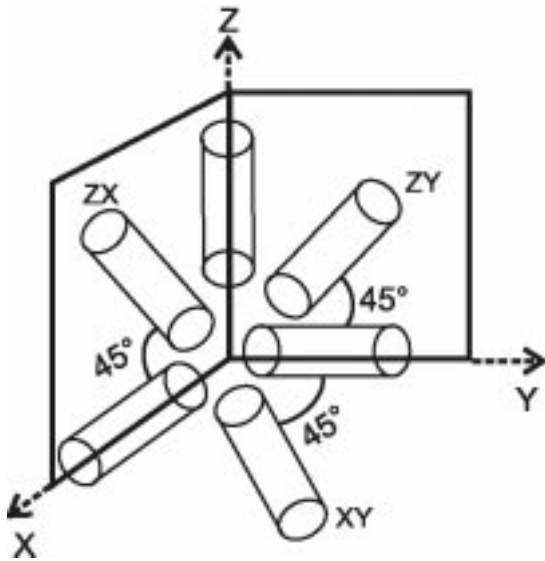
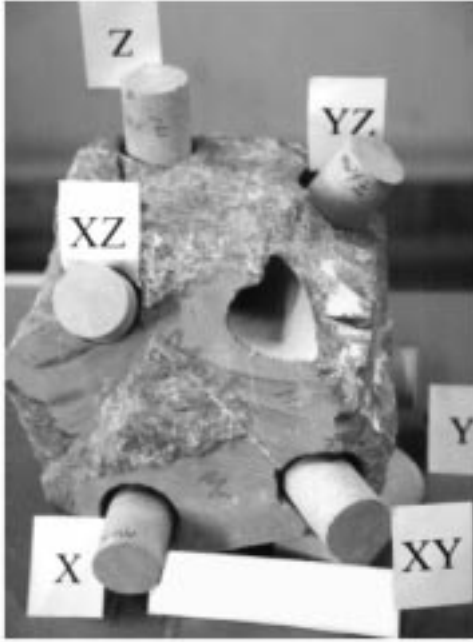
yönlü karot örnekleri üzerinde yapılan AE deneyleriyle “zaman - toplam AE sayısı ve gerilme” grafiğinden KE seviyeleri belirlenerek, kayacın alındığı yerde etkisi altında bulunduğu asal gerilmeler belirlenmiştir. Bu çalışmada, z yönünde alınmış örnek için saptanan gerilme değerinin, kayacın alındığı derinlik ve bunun üzerindeki malzemenin birim hacim ağırlığı gözönünde bulundurularak belirlenen örtü gerilmesi değerine çok yakın olduğu görülmektedir (bknz. Çizelge 2). Bununla birlikte, AE tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliğinin yanı sıra, KE seviyesinin belirlenmesinde kayaç türü-

Çizelge 2. Bigadiç-Simav açık işletmesinden alınan kaya bloğundan elde edilmiş yönlü karot örnekleri üzerinde gerçekleştirilen AE deneylerinden belirlenmiş gerilme değerleri ile asal gerilmeler ve yönleri

Table 2. The stress values determined from the AE tests on the oriented rock core samples obtained from Bigadiç-Simav open pit and the principal stresses with their directions

Derinlik (m)	γ (kN/m ³)	Örtü tabakası gerilmesi (MPa)	Yönlü karotlardan belirlenen gerilme değerleri (MPa)	Asal gerilmeler (MPa)	Asal gerilmelerin eğim* /eğim yönü	
70	20.1	1.41	X=1.86 Y=1.62 Z=1.49	XY=1.89 XZ=1.38 YZ=1.02	$\sigma_1 = 2.31$ $\sigma_2 = 1.66$ $\sigma_3 = 1.00$	36°/249 –16°/327 50°/038

* pozitif eğimler (+) yataydan yukarı doğru, negatif (–) eğimler yataydan aşağıya doğru; γ : birim hacim ağırlık



Şekil 19. AE deneyleri için kayaç bloklarından laboratuvarında yönlü karot örneklerinin hazırlanması.

Figure 19. Preparation of oriented core specimens from rock blocks for AE tests in laboratory.

nün ve kayacın doğal ortamından alındıktan sonra deney yapılıncaya kadar geçen zamanın etkisi gibi faktörler halen tartışılmaktadır. Ayrıca, KE seviyesinin belirlenmesinde bazı sorunlarla da karşılaşabilmektedir. AE tekniğinin arazi gerilmelerinin belirlenmesinde kullanılabilirliği ve yukarıda belirtilen etkiler Tuncay vd.

(2002) tarafından verilmiş olup, burada bu konunun ayrıntısına girilmemiştir.

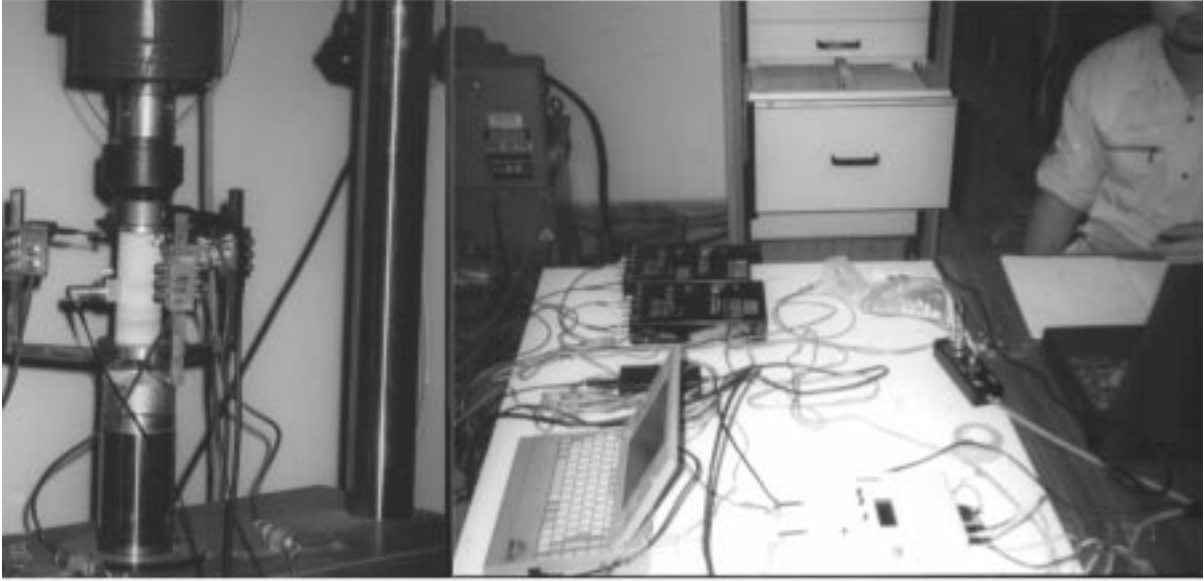
Depremlerin önceden kestirimi (öngörülmesi), yıllardır üzerinde durulan bir konu olmasına rağmen, bilimin bugün ulaştığı düzeyde bu konuya çözüm getirilmiş değildir. Bununla birlikte, gerilme birikmelerinin yorumlanmasını ve depremler sırasında gözlenen bazı sıradışı olayların değerlendirilmesini esas alan deprem tahminine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir. AE tekniğinden yararlanılarak depremlerin önceden kestirimi amacıyla Armstrong vd. (1995) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada Kaliforniya (ABD)civarında meydana gelen depremler ile 30 kHz frekanslı algılayıcılarla belirlenen AE sayısı arasındaki ilişki araştırılmıştır (Çizelge 3). Armstrong vd. (1995), çalışmalarında AE sayısının meydana gelen depremlerle uyum içinde olduğunu belirtmektedirler. Ancak bu tür bir çalışmada daha güvenilir yorumların yapılabilmesi için, öncelikle küçük ve büyük frekanstaki sesleri belirleyebilen algılayıcıların birlikte kullanılarak bir ön değerlendirme yapılması ve sonrasında uygun algılayıcıların seçilmesi gerekmektedir. Adı geçen araştırmacılar kaynak yerini AE tekniğiyle belirleyemediklerinden, algılanan sinyallerin depremin etkisiyle mi, yoksa mikro düzeydeki yerel etkilerle mi meydana geldiği sorusu yanıtız kalmaktadır.

TARTIŞMA VE ÖNERİLER

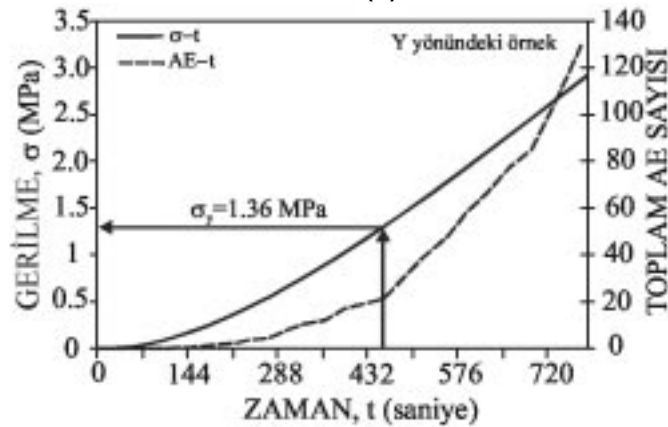
Akustik Emisyon (AE) tekniği, kaya mühendisliği alanında 1970'li yıllardan bu yana yaygın olarak kullanılmasına karşın, Türkiye'de pek fazla tanımamakta olup, birkaç araştırma dışında pek fazla tanınmamakta ve uygulanmamıştır. Çalışmanın amacına bağlı olarak, uygun algılayıcıların seçilmesi, algılayıcıların yerleştirilecekleri yerlerin belirlenmesi ve sistem seçimi, AE tekniğinin başarıyla uygulanabilmesi açısından oldukça önemli faktörlerdir.

AE yöntemi, yeraltı maden işletmeciliği uygulamalarında dikkate değer bir izleme tekniği olarak ön plana çıkmakta ve yeraltında karşılaşılan duraysızlıkların önceden kestiriminde kullanılabilir. Şev duraysızlıklarının izlenmesinde ve önceden kestiriminde önemli bir araç olarak nitelendirilebilecek AE tekniğinin, kayma yüzeyinin belirlenmesinde henüz etkili bir yöntem olarak kullanılmadığı, AE tekniğine oranla, inкли-

(a)



(b)



Şekil 20. (a) Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kaya Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilen AE deneyinden bir görünüm ve (b) yönlü bir karot üzerinde yapılan AE deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak Kaiser Etkisi seviyesinin o yön için belirlenmesi.

Figure 20. (a) A view from an AE test carried out at the Rock Mechanics Laboratory of Geological Engineering Department at Hacettepe University, and (b) determination of the Kaiser Effect level using the results of AE test on an oriented core.

nometrelerden çok daha güvenilir sonuçlar elde edildiği anlaşılmaktadır.

Arazi gerilmelerinin AE yöntemiyle belirlenebilmesi için yapılan çalışmalarda, AE'den elde edilen sonuçlarla arazi deneylerinden elde edilen sonuçların genelde benzer oldukları görülmektedir. Bazı sorunlar içermesine rağmen, AE tekniğinin maliyeti nisbeten düşük ve pratik bir yöntem olması bu amaç için kullanımın şansını artırmaktadır. Türkiye'de Simav Bor Açık İşletme-

sinden alınan bir numune üzerinde yapılan örnek uygulamanın sonuçlarından da, AE tekniğinden belirlenen düşey gerilmenin, kayacın alındığı derinliğe ve örtü kayacının birim hacim ağırlığına bağlı olarak hesaplanan örtü tabakası gerilmesiyle benzer olduğu bulunmuştur. Gelecekte AE yöntemi ve diğer tekniklerle yapılacak gerilme ölçümleri ile bunlardan elde edilecek sonuçların karşılaştırılması, AE ile gerilmelerin belirlenmesi konusuna katkı sağlayacaktır.

Çizelge 3. Varian Well sahasında kurulmuş olan USGS Parkfield (ABD) sismik ağında kaydedilmiş depremler ve depremlerden önceki AE sayıları (Armstrong vd., 1995)

Table 3. The earthquakes recorded at USGS Parkfield seismic network at Varian Well site (USA) and the AE counts before the earthquakes (Armstrong et al., 1995)

Olgu	AE sayısı	Tarih,zaman	Büyüklik (M_L)	Merkez üstüne uzaklık (km)	Derinlik (km)
AE	142/2	23/10/1990,19:50	—	—	—
Deprem	—	24/10/1990,16:47	1.2	2.4	4.9
Deprem	—	26/10/1990,21:57	1.8	18.0	7.5
Deprem	—	28/10/1990,08:14	1.5	32.7	9.0
Deprem	—	28/10/1990,12:17	1.4	33.1	9.2
Deprem	—	28/10/1990,17:48	1.5	18.0	5.3
Deprem	—	29/10/1990,11:09	0.9	7.2	6.4
Deprem	—	02/11/1990,08:08	0.9	16.3	4.8
Deprem	—	02/11/1990,11:30	2.0	28.7	2.3
AE	8/2	02/11/1990,12:45	—	—	—
AE	10/2	02/11/1990,14:45	—	—	—
AE	8/2	02/11/1990,19:45	—	—	—
AE	17/4	03/11/1990,13:45	—	—	—
AE	59/4	03/11/1990,22:45	—	—	—
AE	21/3	04/11/1990,08:45	—	—	—
AE	136/3	04/11/1990,11:45	—	—	—
Deprem	—	04/11/1990,15:32	1.7	2.6	5.4
Deprem	—	07/11/1990,02:21	1.4	15.8	5.0
AE	9/1	09/11/1990,02:45	—	—	—
AE	66/2	09/11/1990,21:45	—	—	—
AE	17/3	11/11/1990,09:45	—	—	—
Deprem	—	14/11/1990,07:26	1.1	10.5	4.8
Deprem	—	14/11/1990,19:34	3.1	7.5	7.9
AE	8/1	15/11/1990,01:45	—	—	—
Deprem	—	15/11/1990,01:58	1.2	18.7	13.4
AE	16/2	15/11/1990,12:45	—	—	—
Deprem	—	16/11/1990,00:57	2.5	8.0	7.9
Deprem	—	16/11/1990,02:05	1.2	8.4	8.4
Deprem	—	16/11/1990,05:36	1.2	1.7	12.7
Deprem	—	16/11/1990,10:18	1.7	6.9	3.8
Deprem	—	16/11/1990,10:18	1.7	6.9	3.8
Deprem	—	16/11/1990,19:58	1.0	9.6	4.4

M_L : Richter yerel büyüklüğü

KAYNAKLAR

Armstrong, B.H., Valdes-Gonzales, C.M., and Leaird, J.D., 1995. Acoustic emission in an earthquake preparation zone. 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, 429-446.

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 Jeotek-

nik Sempozyumu, İzmir, Ö. Orhun ve Y. Tuner (eds.), Bildiriler CD'si, 14 s.

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.

Blake, W., 1971. Rock burst research at the Galena mine, Wallace, Idaho. Bureau of Mines Technical Progress Report, TPR 39, 22pp.

Blake, W., and Leighton, F., 1970. Recent developments and applications of the microseis-

- mic method in deep mines. Proceedings of the 11th Symposium on Rock Mechanics, New York, W.H. Somerton (ed.), AIME, 429-443.
- Chichibu, A., Jo, K., Nakamura, M., Goto, T., and Kamata, M., 1989. Acoustic emission characteristics of unstable slopes. *Journal of Acoustic Emission*, 8(4), 107-112.
- Descour, J.M., 1995. Use of wave spectra in source location – an integral part of source characterization. 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, 529-543.
- 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., 1976. Microseismic monitoring of storage reservoirs. Proceedings of AGA Transmission Conference, Las Vegas, T354-T359.
- Hardy, H. R. Jr., 1978. Some current applications of microseismic techniques in geomechanics. Proceedings of the NATO Symposium on Dynamic Methods in Soil and Rock Mechanics, Karlsruhe, A.A. Balkema Co., Vol. 3, 173-199.
- 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.
- Hardy, H.R.Jr., and Kimble, E.J.Jr., 1995. Application of high-frequency AE/MS techniques to rock slope monitoring. 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, 457-477.
- 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, State College, PA, H.R.Hardy, Jr. and F.W. Leighton (eds.), Trans. Tech. Publications, 27-55.
- Hayashi, M., Kanagawa, T., Hibino, S., Motozima, 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.
- Holcomb, D.J., and Martin, R.J., 1985. Determining peak stress history using acoustic emissions. Proceedings of the 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, E. Ashworth (ed.), A.A. Balkema, 715-722.
- Hooker, V. E., Leighton, F., and Steblay, B.J., 1974. Microseismic investigations in coal mines. *Mining Congress Journal*, 60(10), 66-71.
- 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.), 981-985.
- Ishiguro, Y, Nishino, K., Murakami, A., Sugawara, K., and Kawamoto, T., 1999. In-situ initial rock stress measurement and design of deep underground powerhouse cavern. Proceedings of the ISRM International Congress on Rock Mechanics, Paris, G. Vouille and P. Berest (eds.), Vol. 2, 1155-1158.
- Jaroszewska, A., and Reymond, M.C., 1995. Characteristic features of AE in some rocks. 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, 313-332.
- Jupe, A.J., Barr, S.P., and Pine, R.J., 1992. In-situ stress measurements obtained using overcoring and the Kaiser effect of acoustic emissions within 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, 167-174.
- Kasapoğlu, K.E. ve Gökışık, H., 1982. Akustik emisyon / mikrosismik aktivite ve kaya mekaniğindeki uygulamaları. *Kaya Mekaniği Bülteni*, 1, 27-34.
- Koerner R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., 1977. Acoustic emission studies of soil masses in the laboratory and field. Proceedings of the 1st 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, 243-256.
- Koerner R.M., Lord, A.E.Jr., and McCabe, W.M., 1978. Acoustic emission monitoring of soil stability. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(GT5), 571-582.

- McCauley, M.L., 1977. Monitoring slope stability with acoustic emission. Proceedings of the 1st 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, 257-269.
- 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.
- Obert, L., and Duvall, W., 1945. The microseismic method of predicting rock failure in underground mining. Part II: Laboratory Experiments, U.S. Bureau of Mines, RI 3803, 14pp.
- Ohtsu, M., 1996. The history and development of acoustic emission in concrete engineering. Magazine of Concrete Research, 48 (177), 321-330.
- 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.
- Srinivasan, C., Nair, G.J., and 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.
- Styles, P., Emsley, S.J., and McInairnie, E.A., 1995. Microseismic prediction and control of coal outbursts in Cynheidre Colliery, South Wales, United Kingdom. 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, 383-399.
- Sugawara, K., Kanoko, K., Obara, Y., and Aoki, T., 1987. Prediction of coal outburst. Proceedings of 6th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Montreal, G. Herget and S. Vongpaisal (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 2, 1251-1254.
- Suzuki, T., Hikita, S., and 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.
- Tuncay, E., Ulusay, R., Watanabe, H., Tano, H., Aydan, Ö. ve Yüzer, E., 2002. Akustik Emisyon (AE) tekniği: 2- AE tekniğiyle Türkiye'de arazi gerilmelerinin belirlenmesi konusunda bir ön inceleme. Yerbilimleri, 25, 83-98.
- Ünal, E., Hardy, H.R.Jr., and Bieniawski, Z.T., 1982. New instrumentation for the evaluation of rock bolt behaviour. Proceedings of the 23rd Symposium on Rock Mechanics, California, R.E. Goodman and F.E. Heuze (eds.), Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 985-995.
- Vladut, T.I., and Lepper, M., 1989. Early warning of slope instabilities by microseismic monitoring. 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, 511-529.
- Wang, H.T., Xian, X.F., Yin, G.Z., and 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.
- 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., Ulusay, R., Yüzer, E., Erdoğan, M., and Aydan, Ö., 1999. The initial stress state in Cappadocia. Proceedings of the '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, K. Matsui and H. Shimada (eds.), 249-260.
- Will, M., Rakers, E., and Schulz, R., 1995. Control of burst-prone areas with seismoacoustical measurements. Proceedings of the 5th Conference on Acoustic Emission / Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials, Pennsylvania, H.R.Hardy, Jr. (ed.), Trans Tech Publications, 401-409.